

Sammlung
Elektrotechnischer Lehrhefte
Herausgegeben von Fritz Hoppe

Heft 1

Grundgesetze der allgemeinen Elektrizitätslehre

Verlag von Johann Ambrosius Barth in Leipzig

Verlag von Johann Ambrosius Barth in Leipzig.

Sammlung elektrotechnischer Lehrhefte

Herausgegeben von

Fritz Hoppe
Beratender Ingenieur und gerichtlicher Sachverständiger für Elektrotechnik
Direktor und Dozent an der Technischen Akademie Berlin.

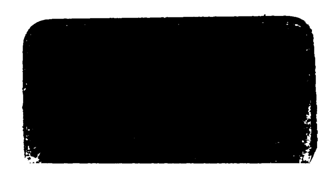
Die vorlie ... ehrhefte verfolgt den Zweck, auf mög ... faden für das Studium der Elektrotech ... idgesetzen der Gleichstromtechnik (... (Heft 2) werden die Anwendungen ... Erläuterung der Meßinstrumente (E ... Meßmethoden (Heft 6 und 7) dem V ... Mit den charakteristischen Eigensch ... en und Motoren, sowie der Wechselstr ... Besprechung der Meßmethoden und ... gemacht. Die Übungsaufgaben (Heft ... ten Heften behandelte Gebiet umfass ... ele, und dienen daher sowohl zur R ... ringen in das Wesen und Wirken ... anzeichnete Lehrgang hat viele Vorte ... in elektrischen Stromkreisen und ... l Stromverbrauchern messend ver ... : für Schritt mit den Eigenschaften

Die Lehrh ... tudierenden bestimmt sind, können ... rotechniker als Nachschlagebücher ... rin alle wichtigen Erscheinungen u ... Praxis unentbehrliche Angaben, Meß ... nend behandelt.



Heft 1: Grundg ... 112 S. mit 118 ... . . geb. Preis M. 4.—
Heft 2: Grundgesetze der Wechselstromtheorie.
Heft 3: Prinzip und Wirkungsweise der technischen Meßinstrumente für Gleichstrom. (VI, 63 S. mit 81 Fig. 1908) . . geb. Preis M. 2.70
Heft 4: Prinzip und Wirkungsweise der technischen Meßinstrumente für Wechselstrom.
Heft 5: Prinzip und Wirkungsweise der Wattmeter und Elektrizitätszähler für Gleich- und Wechselstrom.
Heft 6: Widerstandsmessungen mit Berücksichtigung der Isolationsmessungen, sowie der Widerstands- und Temperaturmessungen an Maschinen und Apparaten. (VI, 101 S. mit 120 Fig. 1908) geb. Preis M. 4.—
Heft 7: Strom-, Spannungs- und Leistungsmessungen, sowie Eichung von Instrumenten.
Heft 8: Messungen an Maschinen und Motoren für Gleichstrom.
Heft 9: Messungen an Maschinen, Motoren und Apparaten für Ein- und Mehrphasen-Wechselstrom.
Heft 10: Übungsaufgaben zu Heft 1—9.

Die Hefte, von denen jedes ein in sich geschlossenes Ganzes bildet, sind einzeln verkäuflich. Jedes Heft wird 4—8 Druckbogen umfassen und gebunden ca. M. 2.50 bis M. 5.— kosten. Die mit Preis versehenen Hefte sind bereits erschienen, Heft 2 ist unter der Presse, die übrigen folgen in kürzester Frist.





Sammlung elektrotechnischer Lehrhefte
Herausgegeben von **Fritz Hoppe**
**Beratender Ingenieur und gerichtlicher Sachverständiger für Elektrotechnik
Direktor und Dozent an der Technischen Akademie Berlin.**

Heft 1

Grundgesetze
der
allgemeinen Elektrizitätslehre

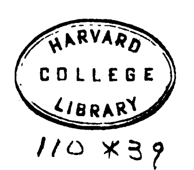
Bearbeitet von

FRITZ HOPPE

Mit 118 Abbildungen



Leipzig
Verlag von Johann Ambrosius Barth
1908



Druck von Grimme & Trömel in Leipzig.

Vorwort.

Die vorliegende Sammlung elektrotechnischer Lehrhefte verfolgt den Zweck, auf möglichst elementarer Grundlage einen Leitfaden für das Studium der Elektrotechnik zu bieten. Ausgehend von den Grundgesetzen der Gleichstromtechnik (Heft 1) und der Wechselstromtechnik (Heft 2) werden die Anwendungen und Wirkungen der Elektrizität durch Erläuterung der Meßinstrumente (Heft 3 bis 5) und der verschiedenen Meßmethoden (Heft 6 und 7) dem Verständnis näher zu führen gesucht. Mit den charakteristischen Eigenschaften der dynamoelektrischen Maschinen und Motoren, sowie der Wechselstromapparate wird der Leser durch die Besprechung der Meßmethoden und Meßergebnisse (Heft 8 und 9) bekannt gemacht. Die Übungsaufgaben (Heft 10), welche das ganze, in den neun ersten Heften behandelte Gebiet umfassen, bieten erweiterte Anwendungsbeispiele, und dienen daher sowohl zur Repetition, als auch zum tieferen Eindringen in das Wesen und Wirken der Elektrizität.

Verfasser glaubt, daß der vorstehend gekennzeichnete Lehrgang viele Vorteile hat. Indem der Lernende die Vorgänge in elektrischen Stromkreisen und an elektrischen Stromerzeugern und Stromverbrauchern messend verfolgt, ist es ihm möglich, sich Schritt für Schritt mit den Eigenschaften der Elektrizität vertraut zu machen. Es wird ihm dann nicht schwer fallen, sich Spezialstudien hinzugeben und die hier gegebenen Grundlagen zu erweitern.

Es liegt in der Natur des beabsichtigten Zweckes, daß die vorliegenden Lehrhefte keine exakte Wissenschaft bieten. Unter Ausschaltung der höheren Mathematik sind die einzelnen Hefte vom rein praktischen Standpunkt aus abgefaßt, theoretische Erörterungen sind nach Möglichkeit vermieden und bei der Besprechung der Gesetze, der Instrumente und Meßmethoden ist manches weggelassen, was dem exakten Wissenschaftler und Theoretiker unverzeihlich erscheinen wird, was aber weggelassen werden mußte, um den Anfänger nicht zu verwirren. Es kam dem Verfasser hauptsächlich darauf an, den Leser in großen Zügen mit den Prinzipien und Wirkungen der elektrischen Erscheinungen bekannt zu machen, und dabei in erster Linie den Bedürfnissen der Praxis Rechnung zu tragen. Der Lernende soll sich vor allem die Erscheinungen wirklich vorstellen können, er soll zunächst elektrisch denken lernen, ehe er mit speziellen theoretischen und wissenschaftlichen Studien beginnt, er soll möglichst

wenig Formeln auswendig lernen, sondern aus wenigen Grundgesetzen und Grundanschauungen heraus sich alles weitere selbständig ableiten können.

Die Lehrhefte, welche in erster Linie für den Studierenden bestimmt sind, können aber auch für den praktischen Elektrotechniker als Nachschlagebücher gute Dienste leisten, denn es sind darin alle wichtigen Erscheinungen und Gesetze, sowie zahlreiche, für die Praxis unentbehrliche Angaben, Meßmethoden und Betriebsvorgänge eingehend behandelt.

Was im vorstehenden von der ganzen Sammlung gesagt ist, gilt naturgemäß auch für das vorliegende erste Heft, welches einen kurzen Abriß der Hauptgesetze der Gleichstromtechnik gibt. Hier kam es dem Verfasser hauptsächlich darauf an, die sogenannte mathematische Elektrizitätslehre in möglichst einfacher Form zu behandeln und dabei immer gleich auf die praktischen Anwendungen der Erscheinungen und Gesetze hinzuweisen. Die Elektrostatik durfte dabei nicht übergangen werden, ebensowenig wie bei Behandlung des absoluten Maßsystemes die Besprechung der elektrostatischen Maßeinheiten weggelassen werden konnte. Der Hauptwert ist aber auf die Kraftlinienlehre gelegt, mit deren Hilfe man sich zahllose, anscheinend verwickelte Vorgänge leicht klar machen kann.

Der Lehrgang ist nach folgenden Gesichtspunkten gegliedert: Nach den ersten vier einleitenden Kapiteln wird zunächst die Erzeugung von elektromotorischen Kräften durch Kraftlinieninduktion, galvanische Elemente und Thermoelemente, sowie die verschiedenen Schaltungsmöglichkeiten von Stromquellen behandelt; darauf folgt die Besprechung der Widerstände und ihre Schaltweise. Damit sind die Bedingungen für ein Zustandekommen eines elektrischen Stromes gegeben, so daß daran anschließend die Ohmschen und Kirchhoffschen Gesetze besprochen werden konnten, um die Grundlagen für die Berechnung der Stromstärke zu geben. Es folgen dann die Kapitel über Leistung, Arbeit und Wirkungsgrad und über die verschiedenen Nutzanwendungen des elektrischen Stromes (Elektromotoren, Wärmewirkungen, elektrochemische und elektromagnetische Wirkungen). Bei den elektrochemischen Wirkungen sind die Bleiakkumulatoren besprochen; die elektromagnetischen Wirkungen, welche eine so bedeutende Rolle spielen, führten zur Behandlung der Solenoide, des elektromagnetischen Verhaltens des Eisens, der Gesetze für die Kraftlinienstromkreise und der Berechnung der Amperewindungen. Am Schluß ist dann noch auf die Wirbelströme, sowie auf die gegenseitige Induktion und Selbstinduktion ganz kurz hingewiesen, die ausführliche Behandlung dieser besonders für die Wechselstromkreise wichtigen Erscheinungen ist in Heft 2 zu finden. Die Übungsaufgaben in Heft 10 bilden eine wertvolle und unentbehrliche Ergänzung zu diesem ersten, sowie zum zweiten Heft, da hier alle Gesetze nur allgemein besprochen werden konnten, während dort an zahlreichen, vollständig durchgerechneten Beispielen die rechnerische Anwendung gegeben ist.

Inhaltsverzeichnis.



---

1. Einleitung.

Das Zustandekommen eines elektrischen Stromes setzt zweierlei voraus:

1. Es muß eine elektrische Spannungsdifferenz (Potentialdifferenz) zwischen denjenigen Punkten vorhanden sein, zwischen denen ein elektrischer Strom fließen soll.

2. Es muß ein elektrischer Widerstand, d. h. ein Stromweg, zwischen denjenigen Punkten vorhanden sein, zwischen denen ein elektrischer Strom fließen soll.

Eine Spannungsdifferenz allein, oder ein Widerstand allein können also keinen Strom hervorrufen, sondern es gehört dazu das Zusammenwirken beider.

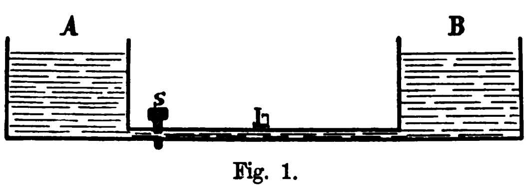


Fig. 1.

Ganz analoge Verhältnisse hat man beim Wasserstrom. In Figur 1 kann durch die Leitung L, trotzdem die Stellung des Hahnes S einen Wasserdurchgang gestatten würde, kein Wasser hindurchfließen, weil kein Druck, d. h. keine Druckdifferenz zwischen dem Wasserbehälter A und dem Wasserbehälter B vorhanden ist. In Fig. 2 kann durch die Leitung L, trotzdem eine Druckdifferenz von H Meter vorhanden ist, kein Wasser hindurchfließen, weil der Stromweg durch den Hahn S abgesperrt, d. h. unterbrochen ist. Erst wenn der Hahn S umgestellt wird, so daß die Leitung L frei wird, erst dann wird sich ein Wasserstrom durch die Leitung L ergießen, und zwar in der Richtung von A nach B, d. h. von dem Behälter höheren Druckes nach dem Behälter niederen Druckes (Fig. 3).

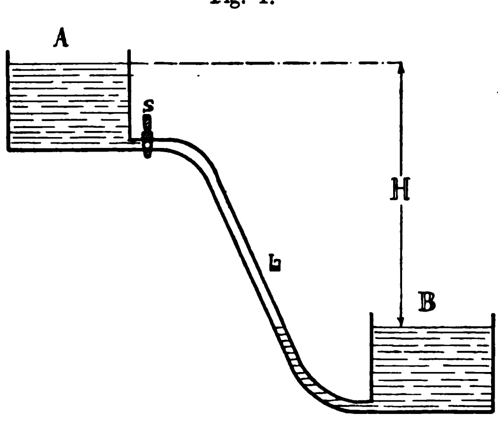


Fig. 2.

Nimmt man an, daß durch eine Vorrichtung E_1 dem Behälter A ständig genau so viel neues Wasser zugeführt wird, und daß bei E_2 immer genau so viel Wasser abläuft als durch die Leitung L fließt, so wird durch

letztere ein konstanter Wasserstrom I immer in ein und derselben Richtung (von A nach B) fließen (Gleichstrom).

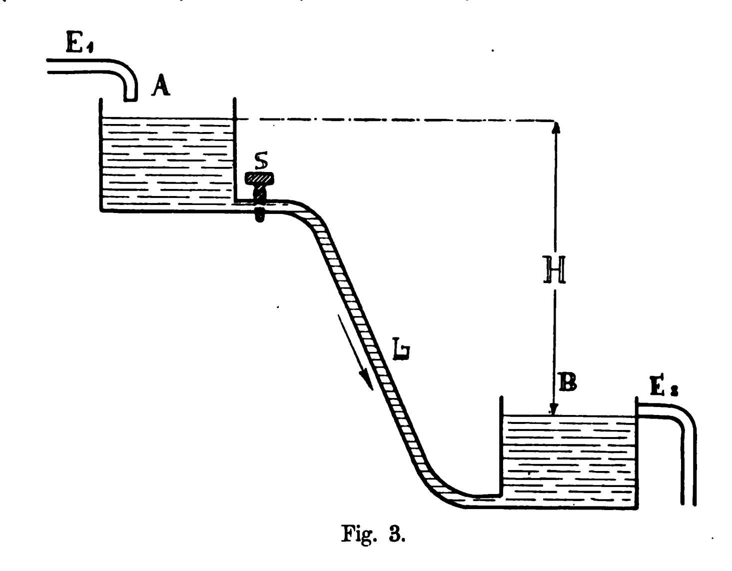


Fig. 3.

Denkt man sich jedoch die beiden Gefäße A und B nach Fig. 4 bis 6 auf eine Wippe gestellt, welche rasch in Bewegung gesetzt wird, so wird abwechselnd das Gefäß A und das Gefäß B höheren Druck haben, es wird also durch die Leitung L abwechselnd ein Strom in der Richtung von A nach B (Fig. 4), dann ein Strom Null (Fig. 5), dann ein Strom von B nach A (Fig. 6) fließen (Wechselstrom[1]).

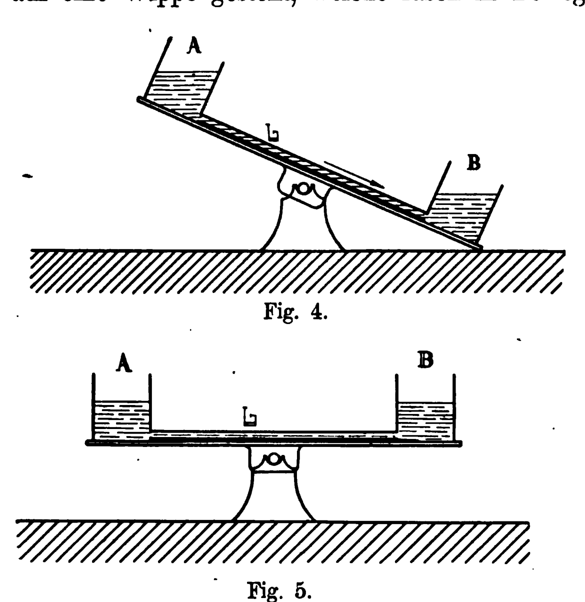


Fig. 4.

Fig. 5.

Beim elektrischen Strom spricht man nun nicht von Druckdifferenz, sondern von Spannungsdifferenz, und drückt deren Größe in Volt aus.

Die Leitung, durch welche der Strom hindurchfließt, setzt dem Durchgange des Stromes einen mehr oder weniger großen Widerstand entgegen; deshalb sagt man: Man verbindet die beiden Punkte, zwischen denen eine gewisse Spannungsdifferenz herrscht, durch einen Widerstand. Die Einheit des Widerstandes ist das Ohm.

[1]) Im vorliegenden Heft werden lediglich die Gesetze des Gleichstroms behandelt werden, mit den Wechselstrom-Vorgängen und -Gesetzen beschäftigt sich Heft 2.

Die Stromstärke wird in Ampere ausgedrückt. Die Beziehungen zwischen den drei Größen werden durch das im Abschnitt 10 näher besprochene Ohmsche Gesetz bestimmt, welches lautet

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}}.$$

Will man einen kontinuierlichen Strom haben, so ist es (wie man aus Fig. 3 erkennt) notwendig, dem Behälter A immer genau so viel Wasser zuzuführen, als die Leitung L wegführt. Es ist also eine gewisse kontinuierliche Kraft notwendig, welche das Wasser bis zu der Höhe H hebt. Man kann sich beispielsweise nach Fig. 7 eine Pumpenvorrichtung E denken, welche das Wasser, welches von B in den Behälter C abfließt, sofort wieder nach A in die Höhe pumpt. Die Kraft dieser Pumpenvorrichtung muß etwas

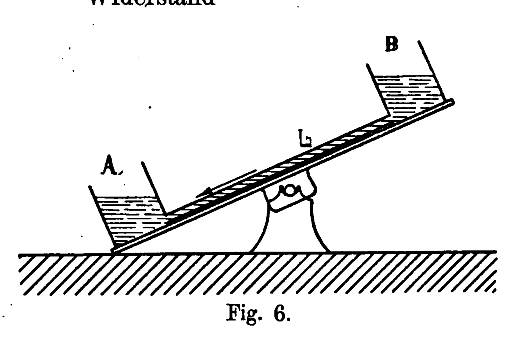


Fig. 6.

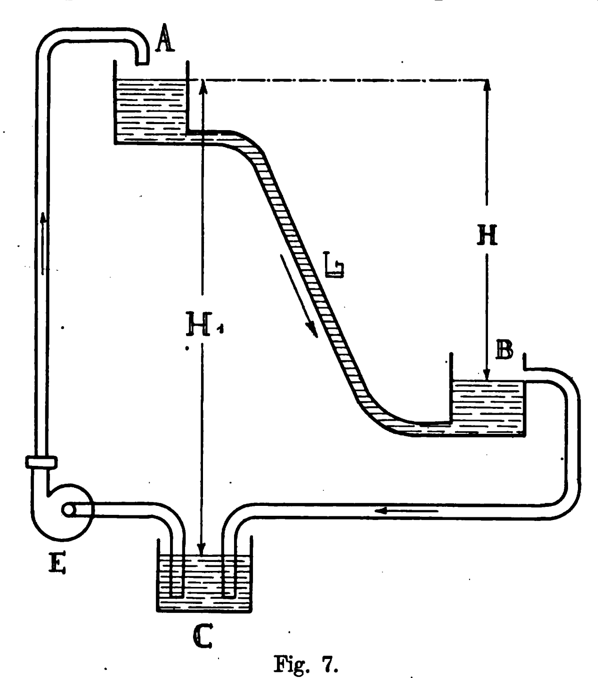


Fig. 7.

größer sein, als der Druckdifferenz H_1 zwischen A und C entspricht, denn mit der Förderung des Wassers von C nach A sind Verluste (Reibungsverluste) verbunden, welche die Pumpe als zusätzliche Arbeit leisten muß. Die Kraft der Pumpe muß also der Druckdifferenz AC plus Verlustarbeit in der Pumpvorrichtung entsprechen.

Der Behälter A stellt das eine Ende, der Behälter C das andere Ende der Pumpvorrichtung und zugleich Anfang und Ende des äußeren Stromkreises dar.

Im elektrischen Stromkreis muß nun ebenfalls eine Kraft wirksam sein, welche kontinuierlich eine Spannungsdifferenz erzeugt. Diese Kraft nennt man elektromotorische Kraft (abgekürzt EMK), welche durch Kraftlinieninduktion (siehe Abschnitt 5), durch galvanische Elemente (siehe Abschnitt 6), durch Akkumulatoren (siehe Abschnitt 16) und durch Thermoelemente (siehe Abschnitt 7) erzeugt werden kann.

Fig. 8 stellt einen Wasserstromkreis dar, analog einem elektrischen Stromkreis. E entspricht der elektromotorischen Kraft. Die im äußeren Stromkreis wirkende Spannungsdifferenz E_k (entsprechend der Druckhöhe AC) ist kleiner als die elektromotorische Kraft E, und zwar kleiner um den Spannungsverlust in der Stromquelle (entsprechend dem Druckverlust

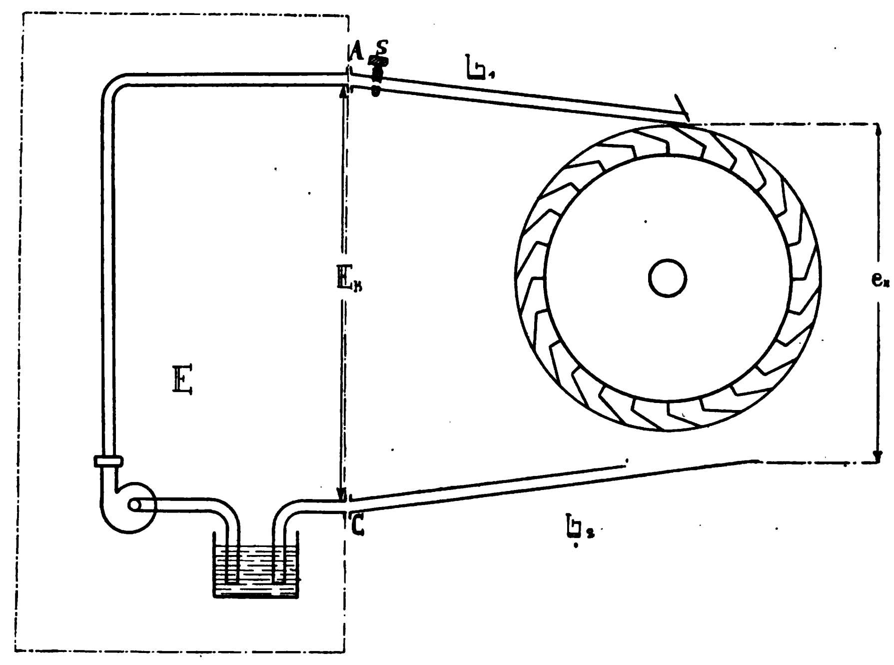


Fig. 8.

in der Pumpvorrichtung). Damit das Wasser von A nach dem Verbrauchsobjekt W (Wasserrad) fließen kann, muß die Leitung ein Gefälle haben; auf dem Wege von A nach W geht also etwas von der Druckdifferenz verloren, es findet ein Spannungsverlust in dieser Leitung statt und die bei W noch zur Verfügung stehende Spannungsdifferenz ist um den Spannungsabfall in der Leitung AW kleiner als E_k. Das Wasserrad W stellt diejenige Vorrichtung dar, in welcher die Druckdifferenz nutzbar gemacht werden soll, oder auf den elektrischen Stromkreis übertragen, diejenige Vorrichtung, in welcher der elektrische Strom Arbeit leisten soll. Die Größe der Arbeitsleistung ist proportional der Größe der Druckdifferenz und der Größe des in der Zeiteinheit über das Wasserrad fließenden Wasserstromes. Im elektrischen Stromkreis ist es ganz analog: die Arbeitsleistung in der Zeiteinheit ist gleich dem Produkte aus Spannung und Stromstärke, die Einheit dieser Leistung heißt Watt.

Fig. 8 auf den elektrischen Stromkreis übertragen, ergibt das in Fig. 9 dargestellte Schaltungsschema:

I = Stromstärke (in Ampere),
W = Nutzwiderstand (in Ohm),
E = Elektromotorische Kraft der Stromquelle (in Volt),
E_k = Klemmenspannung der Stromquelle (in Volt),
e_k = Klemmenspannung, welche am Widerstande W wirksam ist,
S = Ausschalter,
L_1 = Hinleitung,
L_2 = Rückleitung.

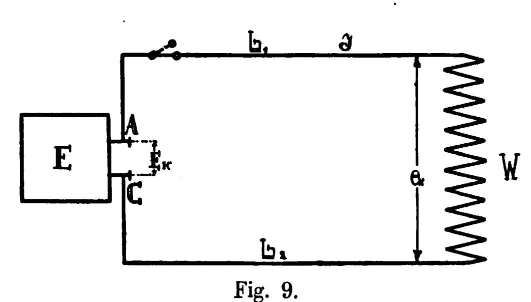


Fig. 9.

Die beiden Enden (oder Klemmen) einer Stromquelle nennt man die Pole der Stromquelle, und zwar spricht man bei einer Gleichstromquelle von einem positiven und einem negativen Pol. Unter positivem Pol versteht man diejenige Klemme der Stromquelle, aus welcher der Strom in den äußeren Stromkreis austritt (in Fig. 8 und 9 Klemme A), unter negativem Pol versteht man diejenige Klemme der Stromquelle, bei welcher der Strom aus dem äußeren Stromkreis zur Stromquelle zurückkehrt[1]).

2. Grundgesetze der Elektrostatik.

Sämtliche Körper zeigen, durch die Hand, durch Fell, Wolle oder Seide gerieben, bemerkenswerte Veränderungen in ihrem physikalischen Verhalten, in ihrer Einwirkung auf andere Körper, sie werden durch die Reibung elektrisch. Man unterscheidet auch hier zwei Arten Elektrizität, und zwar die positive Elektrizität und die negative Elektrizität[2]). Der geriebene Körper nimmt den einen von beiden Zuständen an, der reibende Körper den anderen.

Versuche zeigen, daß ein und derselbe Körper einmal positiv und ein anderes Mal negativ elektrisch werden kann, je nachdem er mit verschiedenen Körpern gerieben wird. So wird z. B. Wolle auf Glas gerieben positiv, auf Harz gerieben negativ elektrisch. Faraday hat eine sogenannte Spannungsreihe aufgestellt, in welcher jeder vorhergehende mit jedem

---

[1]) Die Polarität einer Stromquelle kann man auf folgende Weisen bestimmen: Taucht man die mit einer Gleichstromquelle verbundenen kupfernen Leitungsenden in verdünnte Schwefelsäure, so färbt sich das positive Leitungsende schwarz (Ausscheidung von Kupferoxydflocken), in Kochsalzlösung färbt sich die Flüssigkeit am positiven Leitungsende bläulich; ist der Kupferdraht verzinnt, so färbt sich die Flüssigkeit zuerst weiß. In beiden Fällen wird am positiven Pole weniger Gas wie am negativen entwickelt. Wird mit den beiden Polen je ein Stück Bleiblech verbunden und in verdünnte Schwefelsäure getaucht, so färbt sich das mit dem positiven Pole verbundene Blei braun. Mit Jodkaliumlösung getränktes Papier färbt sich am positiven Pole schwarz. Die Flüssigkeit des Berghausenschen Polsuchers färbt sich am negativen Pole rot. Der positive Kohlenstift einer Bogenlampe strahlt beim Stromdurchgange das meiste Licht aus; nach dem Ausschalten glüht dieser Kohlenstift stärker und länger als der negative. Polreagenzpapier färbt sich am negativen Leitungsende tief rot.

[2]) Positiv elektrisch werden alle Körper genannt, welche denselben elektrischen Zustand zeigen wie ein Glasstab, der mit einem Lederlappen, auf welchem Amalgam aufgetragen ist, gerieben ist, negativ elektrisch alle Körper, deren Zustand dem eben jetzt genannten entgegengesetzt ist (z. B. Harz durch Wolle gerieben).

nachfolgenden Körper gerieben positiv elektrisch wird, während jeder nachfolgende mit jedem vorhergehenden gerieben negativ elektrisch wird.

[Katzenfell, Bärenfell, Flanell, Elfenbein, Federkiele, Bergkristall, Flintglas, Baumwolle, Leinwand, weiße Seide, die Hand, Holz, Lack, Eisen, Kupfer, Messing, Zinn, Silber, Platin, Schwefel.]

Für das gegenseitige Verhalten der beiden Arten von Elektrizität gilt folgendes Gesetz:

Ungleichnamige Elektrizitäten ziehen sich an, gleichnamige Elektrizitäten stoßen sich ab; gleiche Mengen ungleichnamiger Elektrizitäten in einem Körper neutralisieren sich.

In elektrischer Beziehung unterscheidet man zwei Klassen von Körpern, die Nichtleiter oder Isolatoren und die Leiter oder Konduktoren. Die Isolatoren bewahren die Elektrizität auf sich, sie isolieren die Elektrizität, wenn sie einmal auf ihnen erregt ist, die Leiter dagegen leiten die Elektrizität sofort weiter. Auf einem isolierten Leiter kann man den elektrischen Zustand leicht herstellen, auf einem unisolierten Leiter dagegen nicht, weil sich in diesem Falle die Elektrizität sofort über die ganze Erde verbreitet. Ein Isolator ist nur an denjenigen Stellen elektrisch, an denen die Elektrizität erzeugt wird, bei einem Leiter verbreitet sich die erzeugte Elektrizität sofort über seine ganze Oberfläche. Der Unterschied zwischen leitenden und isolierenden Körpern ist kein qualitativer, sondern nur ein quantitativer, und der Übergang von Körpern der einen Art zu Körpern der anderen Art ist kein sprungweiser, sondern ein allmählicher. Man teilt daher die Körper meist nicht nur in zwei, sondern in drei Gruppen, in Leiter, Halbleiter und Nichtleiter, und rechnet zu den Leitern solche Körper, welche die Elektrizität momentan wegleiten, zu den Halbleitern solche, welche hierzu eine meßbare Zeit, also einige Sekunden brauchen, und endlich zu Nichtleitern diejenigen, welche die Elektrizität lange Zeit halten.

Man bezeichnet [1])

als Leiter: Metalle, Holzkohle, Graphit, Säure, Salzlösungen, Seewasser, Quellwasser, Regenwasser, Schnee, lebende Vegetabilien, lebende animalische Teile, lösliche Salze, Leinen und Baumwolle;

als Halbleiter: Alkohol, Äther, Schwefelblumen, trockenes Holz, Marmor, Papier, Stroh, Eis bei 0° C.;

als Nichtleiter: trockene Metalloxyde, fette Öle, Asche, Eis bei —25° C., Phosphor, Kalk, Kreide, Kautschuk, Kampfer, ätherische Öle, Porzellan, getrocknete Vegetabilien, Leder, Pergament, trockenes Papier, Federn, Haare, Wolle, gefärbte Seide, Seide, Edelsteine, Glimmer, Glas, Wachs, Schwefel, Harze, Bernstein, Schellack.

Die Grenzen zwischen den einzelnen Gruppen sind aber nicht unverrückbar, weil die Leitfähigkeit ein und desselben Materials auch von der Beschaffenheit der Oberfläche abhängt, ferner weil Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur großen Einfluß haben.

Die durch Reibung auf einem Körper erzeugte Elektrizität läßt sich durch Berührung auf andere Körper übertragen.

Einen Apparat, der dazu dient, anzuzeigen, ob ein Körper elektrisch ist oder nicht, nennt man Elektroskop. Fig. 10 gibt schematisch die Anordnung eines sogenannten Goldblattelektroskops. Man befestigt zwei

[1]) In der Aufstellung ist mit dem besten Leiter begonnen und mit dem schlechtesten Leiter (bzw. besten Isolator) geschlossen.



leichte Streifchen von Blattgold (als leitender Körper) an einem metallenen Stäbchen, das an seinem anderen Ende eine metallene Kugel, einen Knopf, trägt, und steckt das Stäbchen isoliert in ein Gehäuse mit Glaswänden.

Bringt man die Kugel K mit einem elektrisierten Körper in Berührung, so geht Elektrizität auf die Kugel und die Goldblättchen über, man sagt, die Kugel wird geladen. Da beide Goldblättchen mit gleichnamiger Elektrizität geladen werden, so müssen sie sich abstoßen, d. h. divergieren.

Die Kraft P, welche zwei elektrisierte Körper aufeinander ausüben, ist gleich dem Produkt ihrer Elektrizitätsmengen q_1 und q_2 dividiert durch das Quadrat ihrer Entfernung (r), und diese Kraft ist eine abstoßende, wenn die beiden Körper gleichnamig, eine anziehende, wenn sie ungleichnamig elektrisiert sind (Coulombsches Gesetz)

$$P = \pm \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}.$$

Das Coulombsche Gesetz gilt nur dann, wenn sich zwischen den beiden elektrisierten Körpern Luft befindet. Ist ein anderes Zwischenmedium vorhanden, so wird die Kraft kleiner, als wenn bloß die Luft dazwischen ist (Faraday-Coulombsches Gesetz)

$$P = \pm \frac{q_1 \cdot q_2}{k \cdot r^2},$$

worin k die Dielektrizitätskonstante des Zwischenmediums bedeutet (siehe Seite 9).

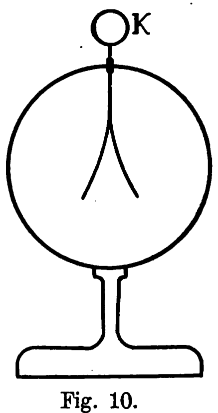


Fig. 10.

Teilt man einem Leiter an einer Stelle eine gewisse Menge Elektrizität mit, so muß diese zunächst wegen ihrer absolut leichten Beweglichkeit auf dem Leiter sich verschieben. Denn die einzelnen elektrischen Teilchen der Ladung suchen sich gegenseitig so weit als möglich abzustoßen, und dieser gegenseitigen Abstoßung folgt die Elektrizität so lange, bis die ganze Ladung nur an der Oberfläche des Leiters ist, wo sie durch den angrenzenden Isolator verhindert wird, weiter den gegenseitigen Abstoßungskräften zu folgen. Erst dann ist ein Ruhezustand, ein Gleichgewichtszustand, erreicht. Daraus ergibt sich der Satz:

Wenn die Elektrizität in einem Leiter im Gleichgewicht ist, so kann sie sich nur an der Oberfläche des Leiters befinden. Das Innere muß unelektrisch sein.

Jeder elektrisierte Leiter besitzt eine gewisse Spannung oder ein gewisses Potential. Diese Spannung ist um so größer, je größer die Elektrizitätsmenge ist, welche auf dem Leiter aufgehäuft ist und je kleiner die Kapazität (die Aufnahmefähigkeit) des Leiters ist[1]).

$$\text{Spannung} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Kapazität}}.$$

[1]) Analogie: Wenn man in ein allseitig geschlossenes Gefäß ein Gas hineinbringt, so wird das Gas einen Druck auf die Wände des Gefäßes ausüben. Je mehr Gas man in das Gefäß bringt, um so größer ist der Druck des Gases. Wenn man ferner ein und dieselbe Menge Gas in Gefäße von verschiedener Form und Größe bringt, so wird der Druck jedesmal ein anderer sein; in dem Gefäß mit größerem Rauminhalt (mit größerer Kapazität) wird ein kleinerer Druck erzeugt werden, als in einem Gefäß mit kleinerer Kapazität.



Die Kapazität eines Leiters ist demnach das Verhältnis der Elektrizität, die auf dem Leiter liegt, zu der Spannung, die dadurch hervorgebracht ist.

$$\text{Kapazität} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Spannung}}$$ [1]).

Zwei verschieden geladene Körper haben im allgemeinen verschiedene Spannung. Verbindet man die beiden Körper durch einen Draht, so bilden sie nur einen einzigen zusammenhängenden Leiter. Da dieser im ganzen eine bestimmte Spannung haben muß, so muß sich der Spannungsunterschied zwischen ihnen ausgleichen: Es bewegt sich die Elektrizität längs des Drahtes von dem einen Körper zum andern, bis überall dieselbe Spannung herrscht.

Die Spannung der Erde wird gleich Null gesetzt, da die Erde als ein unendlich großer Körper angesehen werden kann, in welchem der Druck, den die Elektrizitäten aufeinander ausüben, wegen der großen Entfernung gleich Null ist. Der Spannungsunterschied eines Leiters gegen die Erde ist also direkt gleich der Spannung dieses Leiters selbst.

Die gesamte, einem Leiter zugeführte Elektrizitätsmenge befindet sich, wenn das Gleichgewicht eingetreten ist, auf der Oberfläche, und zwar so verteilt, daß die Spannung überall auf dem Leiter dieselbe ist. Die Dichtigkeit der Elektrizität, d. h. die Menge der Elektrizität pro Flächeneinheit (z. B. Quadratmillimeter), ist nicht überall gleich, sondern sie hängt von der Oberflächenbeschaffenheit (der Gestalt der Oberfläche) ab. Die Dichte ist an den verschiedenen Stellen einer Leiteroberfläche desto größer, je kleiner der Krümmungsradius des betreffenden Flächenelementes ist. Wenn ein Leiter in eine Spitze (Flächenelemente von unendlich kleinem Krümmungsradius) ausläuft, dann ist an dieser Spitze die Dichtigkeit der Elektrizität eine außerordentlich große, eine ganz bedeutend größere, als an jedem anderen Punkte des Leiters. Die Folge davon ist, daß an einer Spitze eines geladenen Leiters die elektrischen Teilchen nach außen von dem Leiter weggetrieben werden (Spitzenwirkung).

Auf einem elektrischen Leiter kann man einen elektrischen Zustand nicht nur durch Berührung mit einem elektrisierten Körper hervorrufen, sondern auch dadurch, daß man einen elektrisierten Körper nur in die Nähe bringt. Man bezeichnet diese Wirkung mit dem Namen Influenz, man sagt, der elektrisierte Körper influenziert auf dem in der Nähe befindlichen Leiter Elektrizität, er erzeugt Influenzelektrizität.

Die Influenzelektrizität bleibt auf einem isolierten Leiter nur so lange, als der influenzierende Körper in der Nähe ist. Auf dem influenzierten Körper sind beide Arten getrennt vorhanden, sowohl positive als auch negative. Derjenige Teil der Oberfläche, welcher dem influenzierenden gegenüberliegt, hat immer die entgegengesetzte Elektrizität wie diese, denn ungleichnamige Elektrizitäten ziehen sich an, gleichnamige stoßen sich ab (Fig. 11). Auf dem influenzierten Körper unterscheidet man die Influenzelektrizität erster Art (dem influenzierenden Körper gegenüber) und die Influenzelektrizität zweiter Art (die von dem influenzierenden Körper weggetrieben wird). In der Mitte liegt eine vollständig unelektrische Zone, die Indifferenzzone.

[1]) Die Einheit der Elektrizitätsmenge ist das Coulomb. Die Einheit der Spannung ist das Volt. Die Einheit der Kapazität das Farad (oder Mikrofarad).



Die Influenzelektrizität erster Art ist durch die anziehenden Kräfte an den influenzierten Körper gebunden, auch dann, wenn man letzteren nicht mehr isoliert, sondern zur Erde ableitet. Dagegen fließt die Influenzelektrizität zweiter Art in diesem Falle ohne weiteres zur Erde ab.

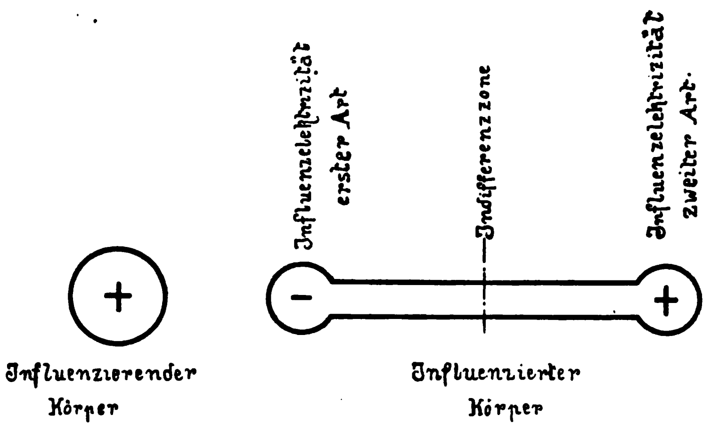


Fig. 11.

Wenn man die Influenzelektrizität zweiter Art zur Erde abgeleitet hat und dann den influenzierten Körper wieder isoliert, so ist er mit Influenzelektrizität erster Art geladen.

Wenn einem geladenen Leiter ein anderer Leiter in die Nähe gebracht wird, der zur Erde abgeleitet ist, so verringert sich die Spannung des ersten bedeutend, trotzdem die Elektrizitätsmenge auf ihm unverändert bleibt, denn durch die Anwesenheit eines influenzierten und abgeleiteten Körpers wird die Kapazität des Leiters bedeutend vergrößert. Man kann also einem solchen Leiter jetzt mehr Elektrizität zuführen, bis er dieselbe Spannung hat. Dies benutzt man bei den Ansammlungsapparaten oder Kondensatoren (Fig. 12). A, die Platte, auf welcher man Elektrizität ansammeln will, nennt man die Kollektorplatte, die geerdete Platte B die Kondensatorplatte.

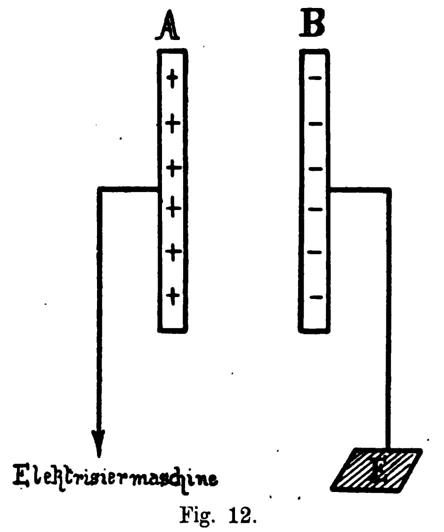


Fig. 12.

Die Kapazität C (in Farad) eines Kondensators hängt von verschiedenen Umständen ab, erstens von der Größe und der Form der leitenden Körper. Je größer die einander gegenüberliegende Fläche F (in cm²) ist, desto größer ist die Kapazität. Sie ist ferner abhängig von der Entfernung d (in cm) der beiden Körper und endlich von der Art des Zwischenmediums (des Dielektrikums[1]).

$$C = k \cdot \frac{F}{4\pi d} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^5} \cdot 10^{-6} = k \cdot 0{,}87 \cdot \frac{F}{d} \cdot 10^{-13} \text{ Farad.}$$

[1]) Die Bezeichnungen Dielektrikum und Isolatoren bedeuten ein und dasselbe. Das eine Mal hebt man die Fähigkeit hervor, auf die elektrische Verteilung einen Einfluß zu üben, das andere Mal nur die Fähigkeit zu isolieren.

k ist die bereits oben Seite 7 erwähnte Dielektrizitätskonstante[1]), sie gibt an, um wievielmal sich die Kapazität vergrößert, falls das Dielektrikum nicht Luft, sondern ein anderes Material ist. Eine Tabelle über die Größe der Dielektrizitätskonstante für die verschiedenen in Betracht kommenden Materialien ist in Heft 2 gegeben.

Enthält der influenzierte Körper eine Spitze, so tritt folgendes ein:

Befindet sich die Spitze auf der dem influenzierenden Körper abgewendeten Seite (Fig. 13), so wird auf der Spitze die Influenzelektrizität

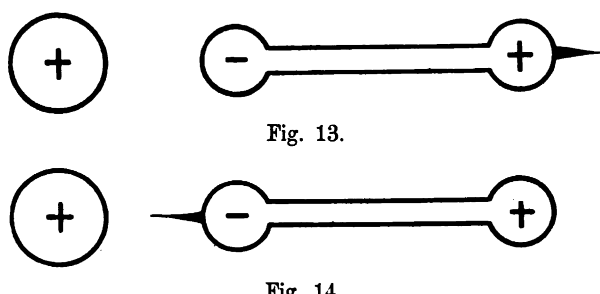


Fig. 13.

Fig. 14.

zweiter Art erregt; da die Dichtigkeit auf einer Spitze außerordentlich groß ist (siehe Seite 8), so strömen die elektrischen Teilchen dort von der Spitze fort. Der influenzierte Leiter behält also die Influenzelektrizität der ersten Art.

Ist die Spitze auf der andern Seite (Fig. 14), so hat die Elektrizität erster Art an der Spitze die größte Dichtigkeit, ebenso sammelt sich gegenüber der Spitze die influenzierende Elektrizität in größerer Dichte an. Es strömt jetzt sowohl an der Kugel als auch an der Spitze Elektrizität aus: der influenzierende Körper verliert an Elektrizität, auf dem influenzierten Körper bleibt Influenzelektrizität zweiter Art zurück[2]).

3. Magnetische Kraftlinien.

a) Kraftlinien eines Magneten.

Unter einem Magneten versteht man einen Eisenstab, der die Eigenschaft besitzt, Eisen anzuziehen. Diese Anziehungskraft tritt am stärksten an zwei Punkten nahe an den Enden des Stabes auf, während sie nach der Mitte zu abnimmt. Die Punkte der größten Kraftwirkung nennt man die Pole des Magneten. Der Polabstand eines Magnetstabes beträgt 0,83 seiner Länge, so daß die Pole P_1 bzw. P_2 um $^1/_{12}$ der Stablänge von den Enden des Magneten entfernt liegen (Fig. 15). In O sind keine Kräfte wirksam, man bezeichnet diese Gegend als die neutrale oder indifferente Zone des Magneten. Die Verbindungslinie zwischen den beiden Polen P_1 und P_2 nennt man die magnetische Achse des Magneten.

Hängt man einen Magnetstab frei beweglich auf, so stellt er sich in die Nord-Südrichtung der Erde ein. Den nach Norden zeigenden Pol nennt man den Nordpol, den nach Süden zeigenden Pol den Südpol des Magneten.

[1]) Die Dielektrizitätskonstante eines Körpers ist gleich dem Quadrate des optischen Brechungskoeffizienten (Maxwellsches Gesetz).

[2]) Man bezeichnet die Wirkung der Spitzen auch als Saugwirkung, wobei aber natürlich an ein Saugen gar nicht zu denken ist.

Den Raum um einen Magneten herum, soweit Kraftwirkungen noch nachweisbar sind, bezeichnet man als sein magnetisches Feld. Dieser Raum ist mit magnetischen Kräften erfüllt, welche in jedem Punkte eine ganz bestimmte Richtung haben. Bringt man ein vollständig unmagnetisches Eisenstück (z. B. einen Nagel, Eisenfeilspäne oder dgl.) in ein Magnetfeld, so wird dieses Eisenstück sofort durch Induktion magnetisch (magnetische Induktion oder Influenz). Bringt man eine andere Magnetnadel in ein Magnetfeld, so stellt sich diese Nadel in jedem Punkte

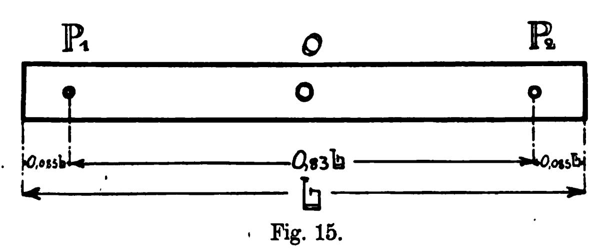


Fig. 15.

in die Richtung der daselbst herrschenden Kraft ein (Fig. 16).

Bezüglich der gegenseitigen Beeinflussung zweier Pole gilt das Gesetz: Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

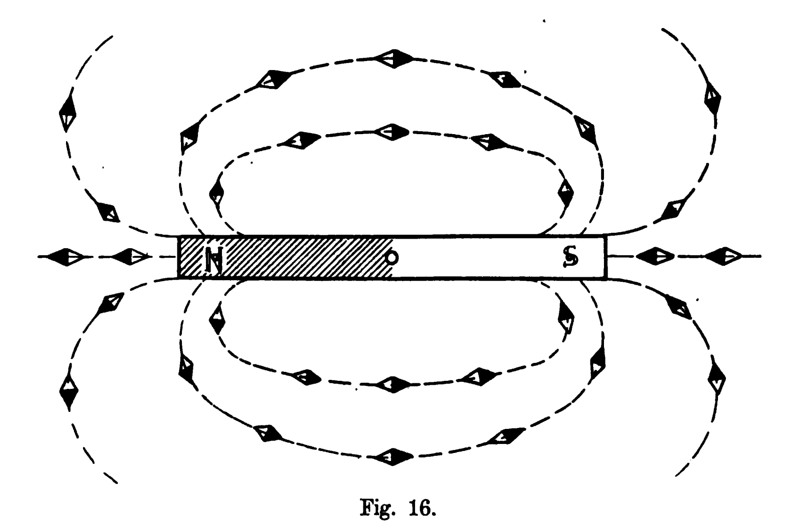


Fig. 16.

Die Richtung, nach welcher der Nordpol der kleinen Nadel (Fig. 16) zeigt, ist die Richtung des Feldes (die Feldrichtung) oder die Richtung der Kraftlinien. Unter Kraftlinien versteht man die Kurven, welche an jedem Punkte die Richtung der Resultierenden der magnetischen Kräfte angeben, die von den beiden Polen des Magneten herrühren.

Ein Kraftliniendiagramm (Fig. 17) erhält man auf folgende Weise: Man bedeckt einen Stabmagneten mit einer Glasplatte und streut Eisenfeilspäne mittels eines feines Siebes auf dieselbe. Die Späne werden durch Induktion magnetisch und reihen sich aneinander zu Kurven zwischen den Polen.

Die Kraftlinien gehen vom Nordpol des Magneten durch den umgebenden Raum zum Südpol und kehren von diesem innerhalb des Ma-

gneten zum Nordpol zurück [1]). Eine Kraftlinie ist demnach eine in sich geschlossene Kurve; der im Inneren des Eisens verlaufende Teil der Kraftlinie heißt Magnetisierungslinie. Derjenige Pol eines Magneten, bei welchem die Kraftlinien aus dem Eisen in die umgebende Luft austreten, ist der Nordpol, oder umgekehrt, die Kraftlinien treten aus dem Nordpol in die umgebende Luft aus.

Um das Wesen dieser Kraftlinien verständlich zu machen, vergleicht Faraday dieselben mit elastischen Bändern (Gummibändern ohne Ende), die durch eine bestimmte Ursache, die magnetisierende Kraft, ausgedehnt werden, so daß sie eine bestimmte Fläche umspannen. Verschwindet die magnetisierende Kraft, so schrumpfen die Kraftlinien zu

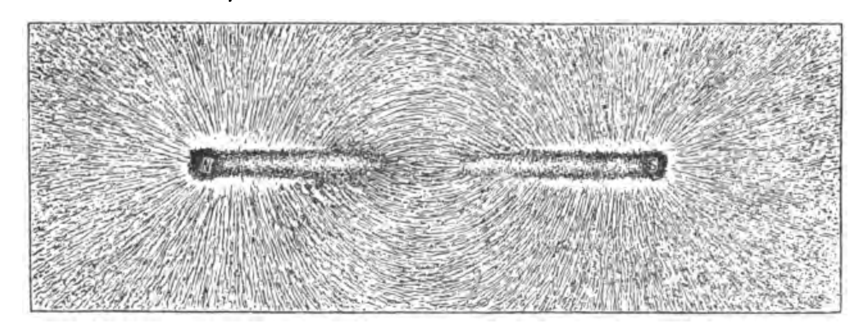


Fig. 17.

einem unwirksamen Punkte zusammen; in dem Maße, als die magnetisierende Kraft wächst, dehnen sich die Kraftlinien aus, so daß sie hiernach eine immer größere Fläche umspannen. Neue Kraftlinien drängen dann, den von den erweiterten Kraftlinien frei werdenden Raum einnehmend, von innen nach. Die Kraftlinien schneiden sich nicht, sondern umhüllen eine die andere.

Aus vorstehenden Ausführungen geht hervor, daß die Kraftlinien nur Hilfsvorstellungen sind, die dazu dienen sollen, das Wesentliche der magnetischen Erscheinungen in einfacher Form erklären zu können. Das magnetische Feld dagegen ist etwas, das immer in und um den Magneten herum wirklich vorhanden ist. Als Maß für die Stärke (Intensität) eines Magnetfeldes, für die Feldstärke, dient die Zahl der Kraftlinien, welche durch eine senkrecht zur Kraftlinienrichtung stehende Fläche von 1 Quadratzentimeter hindurchgehen. Ein Magnetfeld besitzt also die Stärke oder Dichte H, wenn durch ein Flächenstück, welches senkrecht auf der Richtung der Kraftlinien steht und einen Inhalt von 1 qcm besitzt, H Kraftlinien hindurchgehen. Ein Magnet besitzt die Stärke oder Dichte B, wenn durch ein

Fig. 18.

[1]) Denn wenn ein Magnet quer durchgebrochen wird und die beiden Teile ein wenig voneinander gerückt werden, so treten in dem schmalen Luftspalte magnetische Kräfte auf, deren Richtung durch die vom Südpol zum Nordpol verlaufenden Kraftlinien gegeben sind.

Flächenstück, welches senkrecht auf der Richtung der Kraftlinien steht und einen Inhalt von 1 qcm besitzt, B Kraftlinien hindurchgehen.

Es ist also:

H die Zahl der Kraftlinien pro cm^2 in Luft,
B „ „ „ Magnetisierungslinien pro cm^2 in Eisen.

Ist in einem magnetischen Felde die Kraftlinienzahl an allen Stellen dieselbe, d. h. gehen durch jeden Quadratzentimeter des Feldes gleichviel Kraftlinien hindurch, Fig. 18, so spricht man von einem gleichförmigen oder homogenen Feld.

Ein solches homogenes Feld hat man z. B. zwischen den nahe zusammenliegenden und parallelen Polflächen eines Magneten (Fig. 19). Fig. 18 zeigt einen senkrecht zur Kraftlinienrichtung geführten Schnitt durch dieses Magnetfeld. Dabei ist angenommen, daß auf jede Flächeneinheit 4 Kraftlinien entfallen.

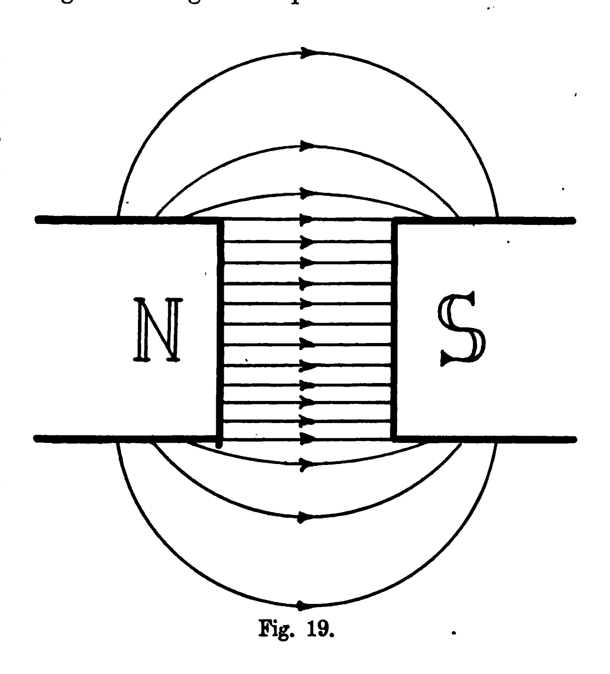


Fig. 19.

b) Kraftlinien eines stromdurchflossenen Leiters.

Magnetische Kraftlinien und damit ein magnetisches Feld entstehen aber nicht nur um einen Magneten herum, sondern auch um einen stromdurchflossenen Leiter. Legt man einen Stromleiter vertikal, so daß er durch die Mitte einer Glas- oder Papierscheibe hindurchgeht, und bestreut die letztere mit Eisenspänen, so ordnen sich diese in konzentrischen Kreisen an, deren Mittelpunkt in der Achse des Stromleiters liegt (Fig. 20).

Die Zahl der entstehenden Kraftlinien ist von der Stromstärke abhängig, je höher die Stromstärke, desto größer ist auch die Kraftlinienzahl. Beim Entstehen des Stromes quellen die Kraftlinien aus dem Leiter hervor und erfüllen (gewissermaßen allmählich fortschreitend) den umgebenden Raum. Beim Verstärken der Stromstärke quellen neue Kraftlinien aus dem Leiter hervor, beim Schwächen der Stromstärke verschwindet ein entsprechender Teil der Kraftlinien, indem diese gewissermaßen wieder in den Leiter zurückkriechen, und beim Ausschalten des Stromes ziehen sich alle Kraftlinien aus dem umgebenden Raum in den Leiter zurück.

Bezüglich der Richtung der Kraftlinien um einen stromdurchflossenen Leiter gilt folgende Regel (Rechtehandregel): Man nehme den Leiter in die rechte Hand so, daß der Daumen in die Richtung des Stromes zeigt, dann zeigen die Fingerspitzen die Kraftlinienrichtung an.

In Fig. 21 und 22 [1]) ist die Kraftlinienrichtung nach eben genannter Rechtehandregel bestimmt. Eine Magnetnadel, welche man rings um den Leiter herumführt, wird die in den Figuren angegebenen Richtungen annehmen.

Genau so, wie die Kraftlinien eines Magneten ein in die Nähe gebrachtes Eisenstück durch Induktion oder Influenz magnetisch machen (siehe Seite 11), genau so wird auch ein Eisen magnetisch, wenn es in das Kraftlinienfeld eines stromdurchflossenen Leiters gebracht wird. Man nennt diese Erscheinung die elektromagnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes, den dadurch hervorgerufenen Magnetismus bezeichnet man mit Elektromagnetismus.

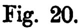


Fig. 20.

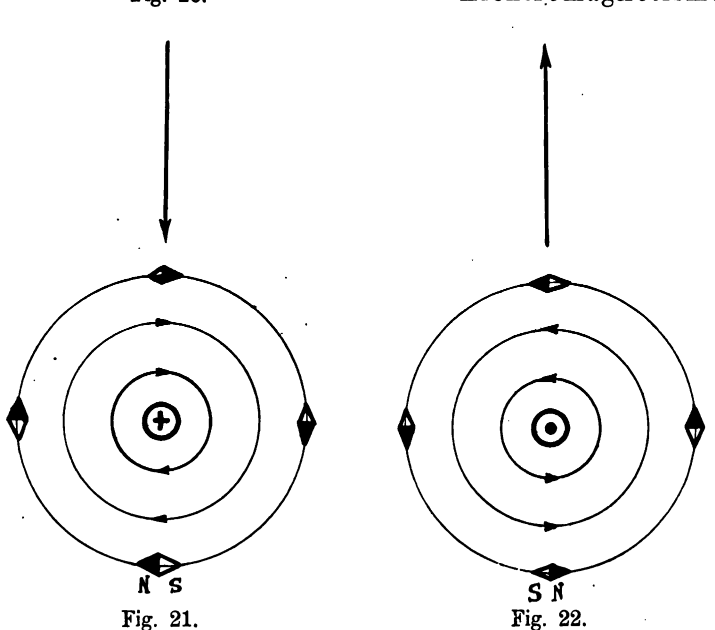


Fig. 21. Fig. 22.

c) Gegenseitige Wirkungen zweier Kraftlinienfelder aufeinander.

Zwei Körper, welche magnetische Kraftlinien aussenden, müssen naturgemäß aufeinander einwirken, da ja von beiden Körpern Kräfte ganz be-

[1]) In den schematischen Zeichnungen bedeutet ⊙ einen stromdurchflossenen Leiter, in welchem der Strom aus der Papierebene herauskommt, ⊕ einen Leiter, in welchem der Strom in die Papierebene hineinfließt.

stimmter Richtung ausgehen. Für diese gegenseitigen Wirkungen gilt folgendes Gesetz:

Kraftlinien, welche einander entgegenlaufen oder voneinander wegstreben, stoßen sich ab, Kraftlinien, welche ineinander hineinlaufen, ziehen sich an; oder mit anderen Worten:

Sind die Kräfte einander entgegengesetzt gerichtet, so erfolgt Abstoßung, sind die Kräfte gleichgerichtet, so erfolgt Anziehung (siehe Figuren 23 bis 26).

Hat man also z. B. zwei Magnetpole[1]) einander gegenüberstehen, von denen der eine festgehalten wird, während der zweite beweglich ist, so gibt es vier Möglichkeiten:

α) Es stehen sich zwei Nordpole gegenüber (Fig. 23): Kraftlinien laufen einander entgegen: Abstoßung.

β) Es stehen sich zwei Südpole gegenüber (Fig. 24): Kraftlinien streben voneinander weg: Abstoßung.

γ) Es steht dem festen Nordpol ein beweglicher Südpol gegenüber (Fig. 25): Kraftlinien laufen ineinander hinein: Anziehung.

δ) Es steht dem festen Südpol ein beweglicher Nordpol gegenüber (Fig. 26): Kraftlinien laufen ineinander hinein: Anziehung.

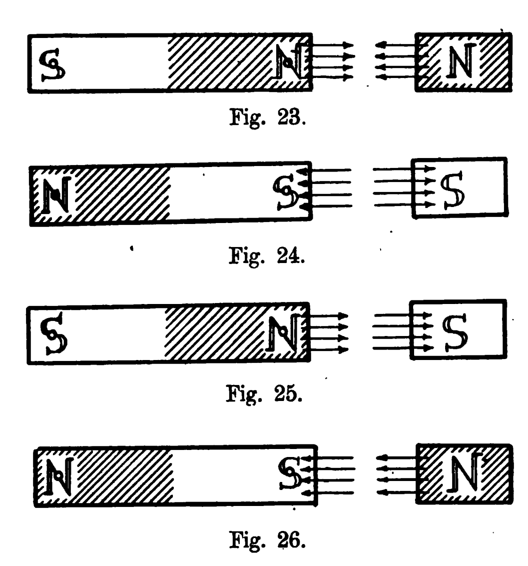


Fig. 23.
Fig. 24.
Fig. 25.
Fig. 26.

Aber nicht nur zwischen zwei Magneten finden solche Kraftwirkungen (magnetische Wirkungen) statt, sondern zwischen allen Körpern, welche magnetische Kraftlinien aussenden, also auch zwischen einem Magneten und einem stromdurchflossenen Leiter (elektromagnetische Wirkungen), sowie zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern (elektrodynamische Wirkungen).

Fig. 27 und 28 zeigen die elektrodynamischen Wirkungen zweier Stromleiter aufeinander und lehren den Satz:

Zwei parallele und gleichgerichtete Ströme ziehen sich an (Fig. 27), zwei parallele und entgegengesetzt gerichtete Ströme stoßen einander ab (Fig. 28). Zwei sich kreuzende Ströme müssen sich daher parallel stellen und zwar so, daß beide Ströme gleichgerichtet sind.

d) Das magnetische Feld der Erde (der Erdmagnetismus).

Wie oben Seite 10 gesagt, nimmt eine freischwebende Magnetnadel eine ganz bestimmte Stellung ein, d. h. sie stellt sich in eine ganz bestimmte Richtung ein. Man nennt diese Nord-Südrichtung, welche man

[1]) Einzelne Magnetpole sind in Wirklichkeit nicht möglich, da zu jedem Nordpol ein entsprechender Südpol gehört. Hier soll jedoch zur Vereinfachung der Anschauung der bewegliche Pol als Einzelpol gedacht sein.



durch die Verbindungslinie der beiden Pole des freischwebenden Magneten erhält, den magnetischen Meridian. Dieser weicht von dem astronomischen Meridian meist um einen gewissen Winkel ab, welcher als Deklination bezeichnet wird (Fig. 29). Die Deklination verändert sich nicht nur mit dem Orte, sondern auch im Laufe des Jahres und sogar während der Tagesstunden[1]).

Würde man eine Magnetnadel genau in ihrem Schwerpunkt selbst aufhängen, so würde sie mit ihrem Nordpol nach unten sich neigen (inkli-

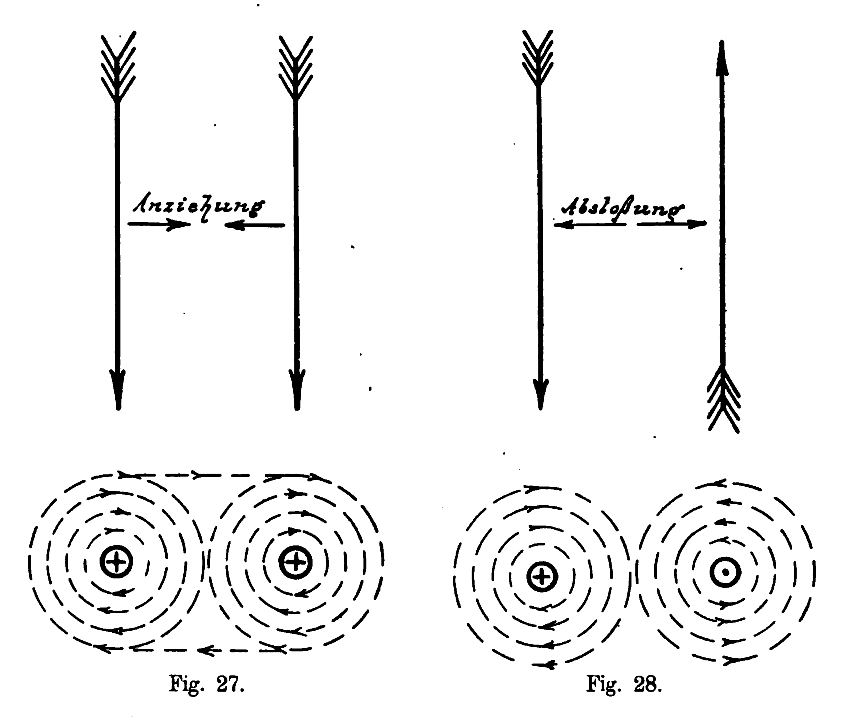


Fig. 27. Fig. 28.

nieren). Man nennt den Winkel zwischen dieser Richtung und dem Horizont die Inklination (Fig. 30). Auch die Inklination ändert sich mit dem Orte[2]) und zwar von 0° (ungefähr am Äquator) bis zu 90° (an den Polen).

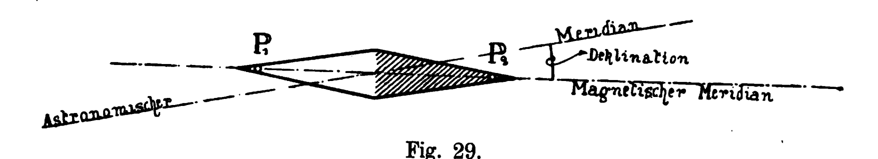


Fig. 29.

Alle diese Tatsachen deuten darauf hin, daß die Erde selbst sich wie ein großer Magnet verhält, der nach allen Richtungen hin Kraftlinien aus-

[1]) Man nennt diejenigen auf der Erdoberfläche gezogen gedachten Linien, welche Punkte gleicher Deklination miteinander verbinden, Isogonen. Die Linie, welche Punkte ohne Deklination verbindet, heißt Agone.

[2]) Man nennt diejenigen auf der Erdoberfläche gezogen gedachten Linien, welche Punkte gleicher Inklination miteinander verbinden, Isoklinen. Die Linie, welche Punkte ohne Inklination verbindet, heißt Akline oder magnetischer Äquator.

sendet und dadurch in dem umgebenden Raume ein magnetisches Kraftfeld, das Erdfeld[1]), bildet, welches auf die in diesem Felde befindlichen Körper einwirkt. Das Erdfeld übt auf jede Magnetnadel eine Richtkraft aus, unter dem Einfluß des Erdfeldes wird weiches Eisen magnetisch. Eine Deklinationsnadel (Fig. 29) zeigt mit ihrem Nordpol nach Norden, mit ihrem Südpol nach Süden, eine Inklinationsnadel (Fig. 30) wendet auf der nördlichen Halbkugel der Erde ihren Nordpol, auf der südlichen Halb-

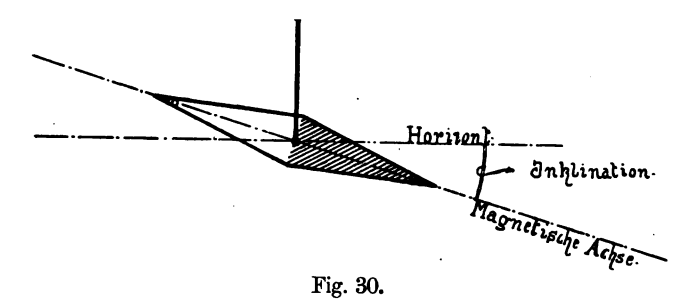


Fig. 30.

kugel ihren Südpol nach abwärts, folglich findet sich der magnetische Südpol der Erde auf der nördlichen Erdhälfte und der magnetische Nordpol auf der südlichen Erdhälfte.

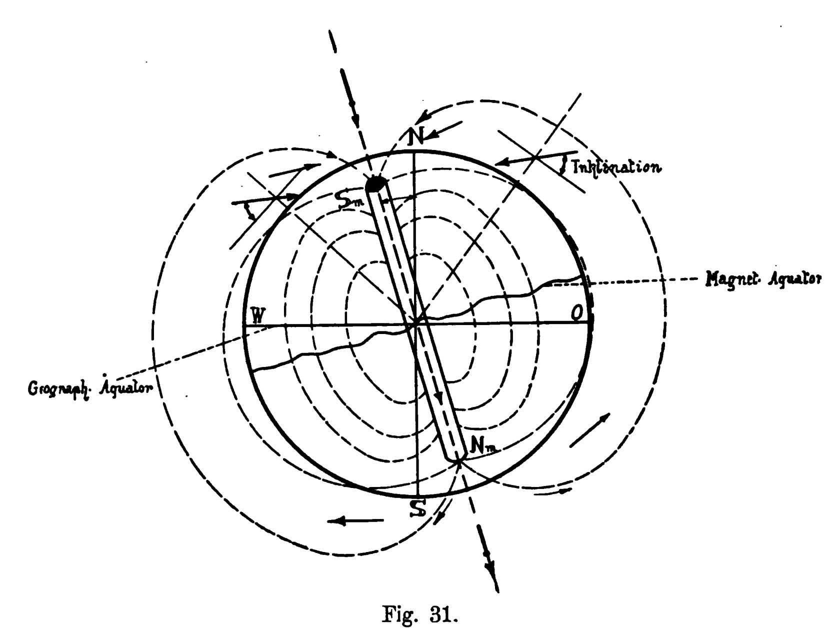


Fig. 31.

Man kann sich (mit Ebert) denken, daß die erdmagnetischen Kraftlinien im Süden von Australien, in Viktorialand, ziemlich dicht und steil austreten. Weiter vom magnetischen Nordpol (Nm) treten ebenfalls Kraftlinien aus dem Erdkörper aus, aber mehr nach Norden geneigt und weniger

[1]) Das erdmagnetische Feld kann als ein homogenes Feld (s. S. 13) bezeichnet werden, da in diesem für einen Raum von geringer Ausbreitung (z. B. für ein Zimmer) die magnetischen Meridiane nahezu parallel zueinander verlaufen.

dicht. Über dem Äquatorgebiet ist die Indifferenzzone. Hierauf treten Kraftlinien vom Außenraume wieder in den Erdkörper ein, anfangs mäßig gegen den Horizont geneigt und dann immer steiler. Im nordamerikanischen Archipel steigen sie scheitelrecht herab, um in großer Dichte im Erdboden aus dem Außenfelde zu verschwinden. Fig. 31 zeigt den eben geschilderten Kraftlinienverlauf im Außenraum des Erdkörpers.

Die Stärke oder Intensität und damit die Richtkraft des Erdfeldes ändert sich naturgemäß ebenfalls mit dem Orte[1]), ferner aber auch mit der Zeit.

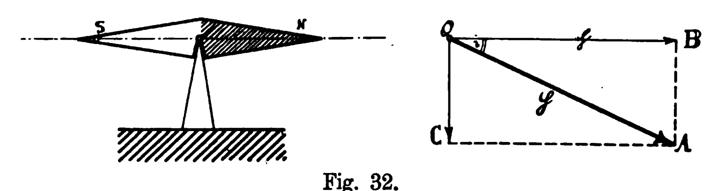


Fig. 32.

Verwendet man Magnetstäbe und Magnetnadeln, die nur horizontal schwingen können (Deklinationsnadeln), so wirkt als Richtkraft nicht die gesamte erdmagnetische Kraft H, sondern nur diejenige Komponente h, deren Richtung die des Horizontes ist.

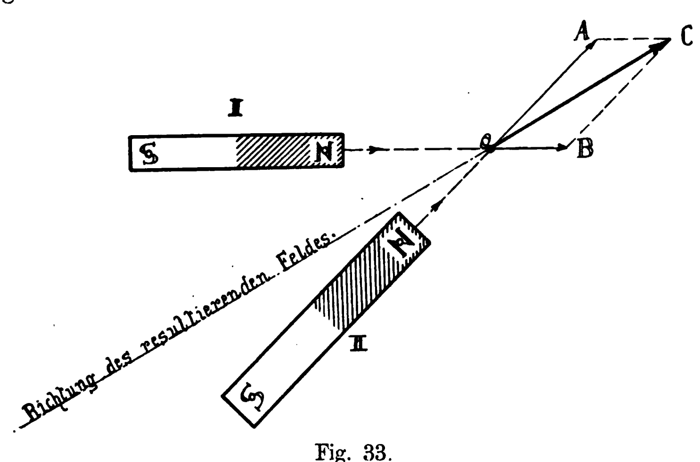


Fig. 33.

Man kann die Stärke eines Magnetfeldes (ausgedrückt in Kraftlinienzahl) in einem bestimmten Maßstab als Strecken unter Berücksichtigung der Kraftlinienrichtung graphisch darstellen. Es stellt in Fig. 32 die Intensität H des Erdfeldes eine Kraft von der Größe und Richtung OA dar. Diese Kraft kann aus zwei Komponenten entstanden gedacht werden, und zwar aus einer Komponente, welche in Richtung der Horizontalen wirkt (Horizontalkomponente OB) siehe Seite 24, und aus einer zweiten, welche in Richtung der Vertikalen wirkt (Vertikalkomponente OC).

Die Horizontalkomponente des Erdfeldes ist demnach

$$h = H \cdot \cos i = H_e,$$

wenn man mit i den Inklinationswinkel des betreffenden Ortes bezeichnet.

---

[1]) Man nennt diejenigen auf der Erdoberfläche gezogen gedachten Linien, welche Punkte gleicher Intensität miteinander verbinden, Isodynamen.



Die Vertikalkomponente des Erdfeldes, welche infolge der Aufhängung der Nadel nicht zur Wirkung kommen kann, ist gleich H · sin i.

Magnetische Deklination, magnetische Inklination und die Stärke oder Intensität des Erdfeldes nennt man die drei erdmagnetischen Elemente.

e) Zusammengesetzte Magnetfelder.

Schon oben wurde angegeben, daß man die Kraftlinienzahl nach Größe und Richtung, wie jede andere Kraftwirkung, als Strecken graphisch darstellen kann. Wirken nun in einem Raum zwei oder mehr magnetisierende Kräfte, so wird sich ein resultierendes Magnetfeld ergeben, dessen Größe und Richtung man nach den Gesetzen von dem Parallelogramm der Kräfte oder von den Kraftecken bestimmen kann.

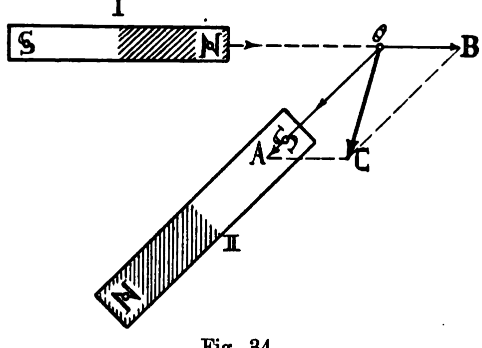


Fig. 34.

In Fig. 33 bis 36 ist die graphische Ermittlung des resultierenden Magnetfeldes durchgeführt, für den Fall, daß zwei magnetisierende Kräfte vorhanden sind. Dabei ist angenommen, daß der Magnet II doppelt so stark ist als Magnet I. Man erkennt, wie die resultierende Feldstärke OC teils größer (Fig. 33 und 35), teils kleiner (Fig. 34 und 36) als die Feldstärke des Magneten II ist, daß also durch Hinzufügen des Magnet I eine Feldverstärkung oder eine Feldschwächung hervorgerufen werden kann.

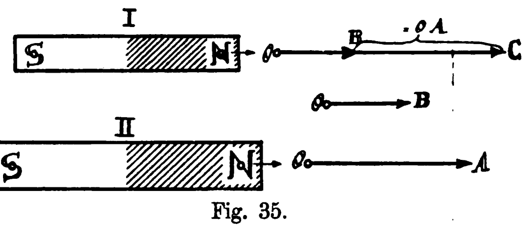


Fig. 35.

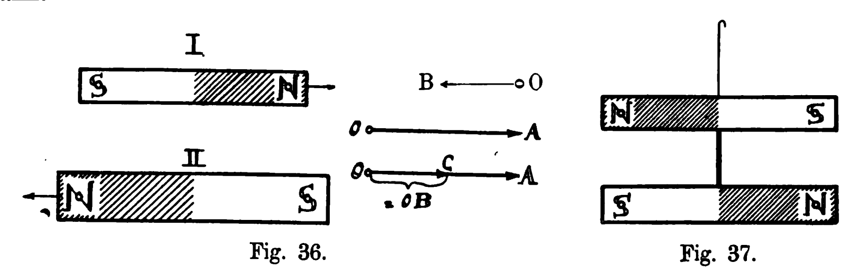


Fig. 36. Fig. 37.

Nimmt man beispielsweise an, die vom Magnet I ausgehenden Kraftlinien seien die vom Erdmagnetismus herrührenden, so erkennt man, daß man durch verschiedene Lagen von Magnet II (Richtmagneten) das Erdfeld in weiten Grenzen verstärken und schwächen kann[1]).

Verbindet man nach Fig. 37 zwei ziemlich gleichstarke Magnete so,

[1]) Über die Anwendung der Richtmagnete bei galvanometrischen Messungen siehe Heft 3.

daß die magnetischen Achsen parallel sind und die entgegengesetzten Pole einander gegenüberstehen, so erhält man ein sogenanntes astatisches Nadelpaar, welches ein nur ganz schwaches Magnetfeld aussenden wird, selbst dann, wenn die Einzelmagnete sehr stark sind[1]).

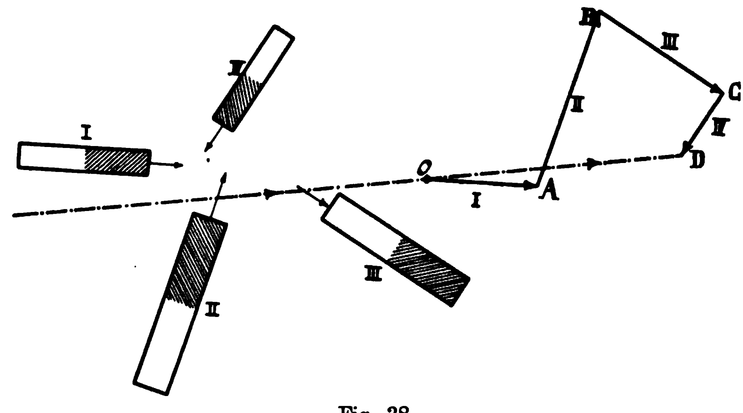


Fig. 38.

Wirken mehr als zwei magnetisierende Kräfte in einem Raum, so ermittelt man nach Fig. 38 die Richtung und Größe des resultierenden Feldes durch Aufzeichnen des Kräftepolygons. Die Stärken OA, AB, BC und CD

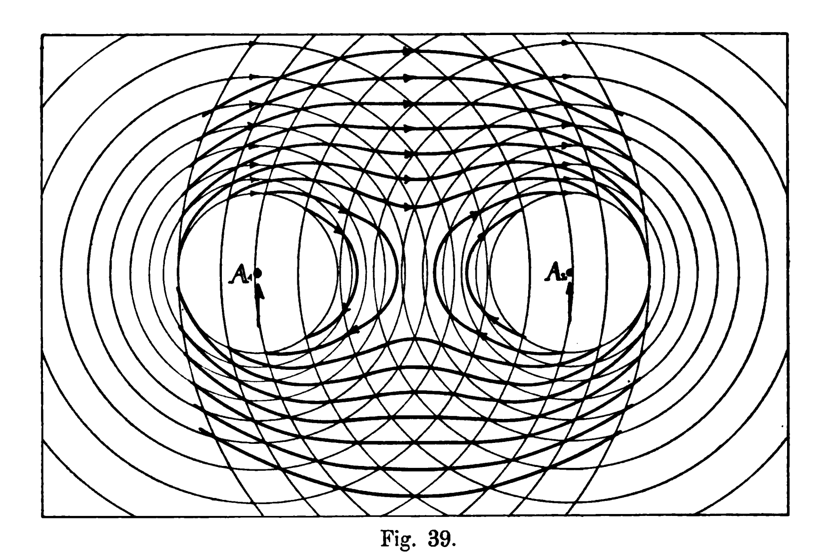


Fig. 39.

entsprechen nach Größe und Richtung den Magnetfeldern der Magnete I, II, III und IV. Die Schlußlinie OD des Kräftepolygons OABCD ergibt das resultierende Feld nach Größe (OD) und Richtung (von O nach D).

In Fig. 39 und 40 sind die Kraftliniendiagramme für zwei stromdurchflossene Leiter (vgl. Fig. 27 und 28) ermittelt, indem die in jedem Punkte des Raumes wirkenden beiden Kräfte geometrisch addiert wurden.

[1]) Über die Anwendung der astatischen Nadelpaare für Galvanometer siehe Heft 3.

f) Fundamentalgesetze von Coulomb und Gauß.

Die Stärke eines Magneten ist durch die aufgenommene magnetische Quantität oder magnetische Menge, welche man sich an den beiden Polen konzentriert denkt, bestimmt. Der Begriff der magnetischen Quantität wird aus dem nachfolgenden Coulombschen Gesetz definiert.

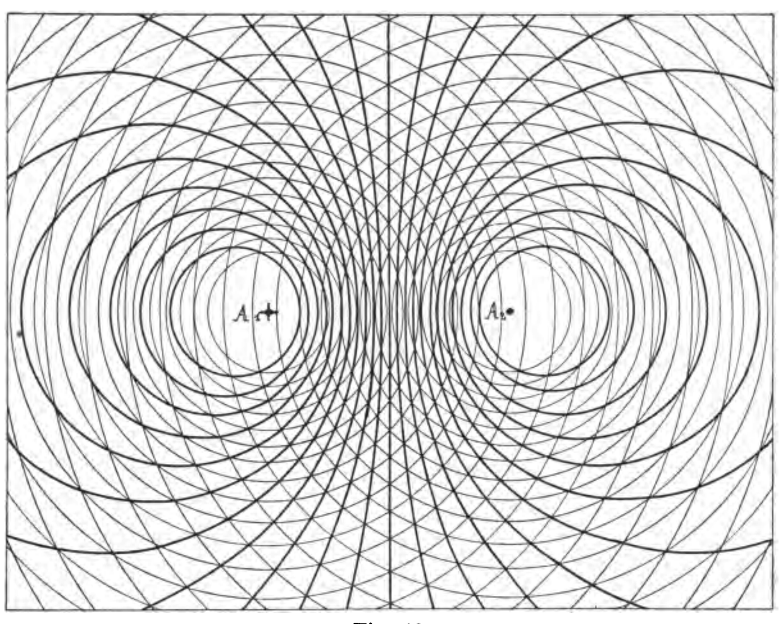


Fig. 40.

In dem Punkte A (Fig. 41) sei eine nordmagnetische Menge m_1, in B eine südmagnetische Menge m_2 konzentriert. Die Entfernung zwischen A und B betrage 1 cm. Dann ist die Kraft, mit welcher diese beiden magnetischen Mengen einander anziehen, direkt proportional dem Produkt

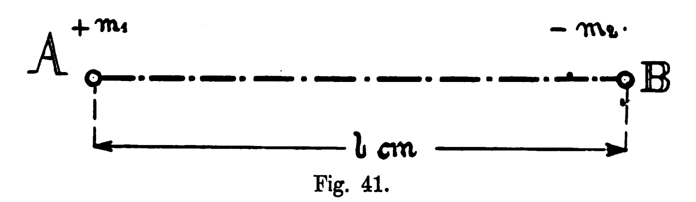


Fig. 41.

der beiden Mengen und umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung, also

$$P = \frac{(+m_1) \cdot (-m_2)}{l^2} = -\frac{m_1 \cdot m_2}{l^2} \text{ (Anziehung).}$$

Sind m_1 und m_2 gleichnamig, so findet eine Abstoßung statt, die Größe der abstoßenden Kraft ist wieder nach obiger Gleichung zu berechnen.

$$P = +\frac{m_1 \cdot m_2}{l^2} \text{ (Abstoßung).}$$

Sind die beiden Mengen m_1 und m_2 einander gleich, also $m_1 = m_2 = m$, so folgt

$$P = \frac{m^2}{l^2},$$

und

$$m = l\sqrt{P}.$$

Daraus folgt, daß man als Einheit der magnetischen Menge diejenige bezeichnet, welche auf eine in 1 cm Entfernung befindliche gleichstarke magnetische Menge die Kraft [1]) $P = 1$ (einen Zug oder Druck von ca. 1,02 Milligramm) ausübt.

In Wirklichkeit kann man die zwei verschiedenen magnetischen Mengen (Nordmagnetismus und Südmagnetismus) voneinander getrennt nicht herstellen, sie treten vielmehr immer gleichzeitig und in gleichen Mengen auf. Wie schon oben, Seite 10, gesagt, denkt man sich bei einem Magneten den Magnetismus in zwei Punkten, und zwar den gesamten Nordmagnetismus am Nordpol, den gesamten Südmagnetismus am Südpol konzentriert. Diese beiden Punkte liegen ca. 0,83 der Gesamtlänge des Magnetstabes voneinander entfernt.

Macht man diese Voraussetzungen, so kann man die Wirkungen eines Magnetstabes leicht mathematisch behandeln. In Fig. 42 bedeutet NS einen Stabmagneten, $AB = l$ die Entfernung der beiden, die Polstärke m besitzenden Pole. In C (im Abstande L von B entfernt) möge sich ein Einzel-

Fig. 42.

pol von der Stärke $+M$ befinden. Die drei Punkte ABC sollen in einer und derselben Geraden (in der magnetischen Achse des Magneten) liegen. Es wird dann $+M$ von $-m$ mit einer Kraft P_1 angezogen, gleichzeitig aber von $+m$ mit einer Kraft P_2 abgestoßen. Da augenscheinlich P_1 größer ist als P_2, so muß sich als resultierende Kraft $P = P_1 + P_2$ eine Anziehung ergeben.

$$P_1 = \frac{-m \cdot +M}{L^2} \quad \text{und} \quad P_2 = \frac{+m \cdot +M}{(l+L)^2},$$

folglich

$$P = P_1 + P_2 = -\frac{m \cdot M}{L^2} + \frac{m \cdot M}{(l+L)^2}$$
$$= -m\,M\left(\frac{1}{L^2} - \frac{1}{(l+L)^2}\right)$$
$$= -m \cdot M \frac{2Ll + l^2}{L^4 + 2L^3 \cdot l + L^2 l^2}.$$

Ist l gegenüber L sehr klein, d. h. ist der Magnetstab kurz und M in verhältnismäßig großem Abstand, so kann man im Zähler l^2 gegen $2Ll$ und im Nenner $2L^3 l + L^2 l$ gegenüber L^4 vernachlässigen und man erhält

$$P = -\frac{m \cdot M \cdot 2Ll}{L^4} = -m \cdot l \cdot \frac{2 \cdot M}{L^3}.$$

[1]) Die Einheit der Kraft ist (nach Seite 27) 1 Dyne $= \sim \frac{1}{981}$ g $= 1{,}02$ mg.

Das Produkt $m \cdot l$ (Polstärke mal Polabstand) heißt das **magnetische Moment des Magnetstabes.**

Die Gleichung $P = \pm m \cdot l \frac{2M}{L^3}$ [1]) wurde von Gauß zuerst aufgestellt und wird nach ihm benannt.

g) Kraftlinienzahl und Feldstärke.

Das Wort Kraftlinie wird, wie aus den Darlegungen auf Seite 11 hervorgeht, zur Definition einer gewissen magnetischen Kraft verwendet. Die Einheit der Kraftlinien ergibt sich aus folgender Betrachtung.

In Fig. 43 sei im Punkte G eine magnetische Menge $m = 1$ konzentriert. Die derselben innewohnende magnetische Kraft verbreitet sich gleichmäßig nach allen Richtungen des Raumes, woraus folgt, daß in jedem Punkte der Oberfläche einer um den Punkt G beschriebenen Kugel gleiche Kraftwirkungen vorhanden sind.

Unter einer magnetischen Kraftlinie versteht man nun diejenige Kraft, welche die magnetische Menge 1 auf einen Quadratzentimeter einer um den Sitz der magnetischen Menge mit dem Radius 1 cm beschriebenen Kugeloberfläche ausübt.

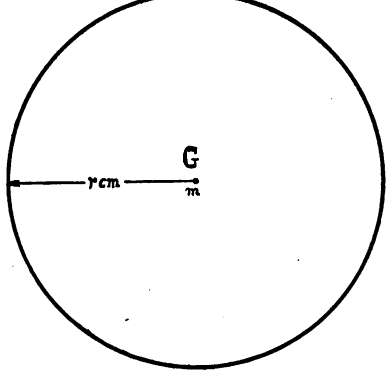


Fig. 43.

Da eine Kugel vom Radius $r = 1$ eine Oberfläche $F = 4\pi\ r^2 = 4\pi$ qcm hat, so sendet also eine magnetische Menge $m = 1$ im ganzen 4π solcher Kraftlinien aus. Eine Kraftlinie kann daher auch definiert werden als der 4π-te Teil der gesamten, der magnetischen Menge 1 innewohnenden Kraft.

Die Anzahl Kraftlinien Z, welche die magnetische Menge m aussendet, ist

$$Z = 4\pi \cdot m.$$

Die Feldstärke H wird durch diejenige Anzahl Kraftlinien gemessen, welche auf einen Quadratzentimeter einer senkrecht auf der Kraftlinienrichtung stehenden Fläche entfallen (s. Seite 12). Ist die Fläche Q cm² von Z Kraftlinien durchsetzt, so ist

$$H = \frac{Z}{Q}.$$

Bei einer Kugel ist $Z = 4\pi m$ und $Q = 4\pi r^2$, also

$$H = \frac{4\pi m}{4\pi r^2} = \frac{m}{r^2}.$$

Da $\frac{m}{r^2} \left(= \frac{1 \cdot m}{r^2}\right)$ die Kraft ist, mit welcher die magnetische Menge 1 von der Menge m angezogen bzw. abgestoßen wird, so erhält man für die Feldstärke folgende Definition:

Die Feldstärke H bedeutet die Kraft, welche auf die magnetische Menge 1 an der betreffenden Stelle des Raumes einwirkt.

[1]) P in Dynen, l und L in Zentimetern, m und M in den Seite 29 definierten Einheiten der magnetischen Quantität.

Ist in einem Felde von der Stärke H eine magnetische Menge M, so ist die auf diese Menge wirkende Kraft $P = H \cdot M$ (Dynen).

Eine praktische Anwendung des vorstehenden Gesetzes ist bei den in Heft 3 besprochenen Meßinstrumenten gegeben, bei welchen ein magnetisches Feld eine unter dem Einfluß der Horizontalkomponenten H_e des Erdmagnetismus[1]) stehende Magnetnadel beeinflußt und aus ihrer Nordsüdrichtung ablenkt.

Die Pole S und N (Fig. 44) haben die Stärke M, die Pole s und n die Stärke m. Die Kraft P_1, mit welcher der Magnet SN auf den Magnet s anziehend und auf n abstoßend einwirkt, ist nach Seite 22

$$P_1 = (L \cdot M) \cdot \frac{2\,m}{x^3}.$$

Die Kraft wirkt zweimal an dem Hebelarm $\frac{l}{2} \cdot \cos\alpha$, so daß das Drehmoment gleich ist $2 \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos\alpha \cdot (L \cdot M) \cdot \frac{2\,m}{x^3} = \frac{2\,(L \cdot M)\,(l \cdot m)}{x^3} \cdot \cos\alpha.$

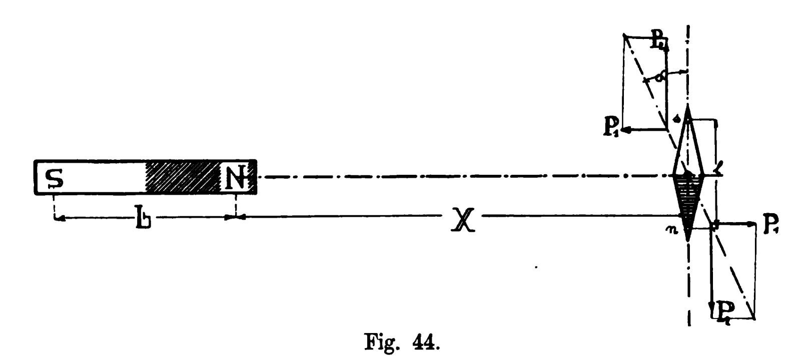


Fig. 44.

Die Kraft P_2, mit welcher die Horizontalintensität H_e des Erdmagnetismus die Nadel ns anzieht, ist wie auf dieser Seite oben 1. und 2. Zeile gesagt ist,

$$P_2 = m \cdot H_e.$$

Diese Kraft wirkt zweimal an dem Hebelarm $\frac{l}{2} \cdot \sin\alpha$, so daß das Drehmoment gleich ist $2 \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin\alpha \cdot m\,H_e = (l \cdot m)\,H_e \cdot \sin\alpha.$

Damit die Nadel im Gleichgewicht bleibt, müssen die beiden Drehmomente einander gleich sein, also

$$2 \cdot \frac{(L\,M)\,(l\,m)}{x^3} \cdot \cos\alpha = (l \cdot m) \cdot H_e \cdot \sin\alpha.$$

Daraus berechnet sich das magnetische Moment $L \cdot M$ des Magneten NS zu

$$L \cdot M = \frac{H_e}{2} \cdot x^3 \cdot \operatorname{tg}\alpha$$ [2]).

[1]) Die Horizontalintensität des Erdmagnetismus beträgt für Deutschland ungefähr $H_e = 0{,}18$—$0{,}21$.

[2]) Dabei ist Bedingung, daß die Nadel ns kurz und die Entfernung gegenüber L groß ist (s. Seite 22).

Da die Gesamtzahl der von dem Magnetstab ausgesandten Kraftlinien Z gleich $4\pi M$ ist, so folgt

$$M = \frac{Z}{4\pi} \text{ und } L \cdot M = \frac{L \cdot Z}{4\pi},$$

folglich
$$\frac{H_e}{2} x^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{L \cdot Z}{4\pi}$$

und
$$Z = \frac{2\pi \cdot H_e \cdot x^3}{L} \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

worin L den Polabstand (= 0,83 mal der ganzen Länge) des Magnetstabes NS bedeutet.

Man kann also auf diese Weise die Kraftlinienzahl eines Magneten durch Messung ermitteln.

Die Kraft, mit welcher ein Magnet ein anderes Eisenstück (seinen Anker) anzieht, ist nach den Untersuchungen von Maxwell bestimmt durch die Gleichung

$$P = \frac{B^2 \cdot Q}{8\pi} \text{ Dynen}$$

oder mit großer Annäherung $P = \left(\frac{B}{5000}\right)^2 Q \cdot \text{Kilogramm},$

wenn P die Anziehungskraft des Magneten,
B die Kraftlinienzahl pro Quadratzentimeter,
Q die kraftlinienführende Berührungsfläche in cm^2 zwischen Magnet und Anker bedeutet.

Für $B = 10000$ wird die Anziehungskraft pro Quadratzentimeter kraftlinienführende Berührungsfläche

$$\frac{P}{Q} = \left(\frac{10000}{5000}\right)^2 = 4 \text{ kg}.$$

In der Praxis wird B höchstens 20000 gemacht, also entsteht eine maximale Anziehungskraft von 16 kg pro cm^2.

4. Absolutes und technisches Maßsystem.

a) Allgemeines über das absolute Maßsystem.

Die Maßeinheiten, welche den Namen absolute Einheiten führen, unterscheiden sich von den anderen Maßeinheiten durch dreierlei Eigenschaften.

Die erste ist, daß sie alle, wenn auch noch so verschiedenartig und beim ersten Anblick unabhängig voneinander, auf sehr einfache Weise abgeleitet sind von nur drei bestimmten Einheiten, welche fundamentale Einheiten heißen, nämlich von den Einheiten der Länge, der Masse und der Zeit, während man alle nanderen den Namen abgeleitete Einheiten gibt. Vermöge dieses gemeinschaftlichen Ursprunges bilden alle zusammen ein einziges System, in welchem jede Einheit abhängig von allen anderen genannt werden kann. Da die oben erwähnten drei Fundamentaleinheiten, aus welchen alle anderen sich zusammensetzen, verschiedene Werte annehmen können, so können ohne Änderung in der Ableitungsweise und in

ihren gegenseitigen Verhältnissen, alle abgeleiteten Einheiten verschiedene Werte erhalten, indem sie ebensoviele Systeme bilden, als verschiedene Grundlagen gewählt worden sind.

Eine zweite Eigenschaft der absoluten Einheiten ist die, daß sie Werte haben, welche zufälligen Veränderungen nicht unterworfen sind, worauf eben ihre Bezeichnung als absolute beruht. Die Gramm-Masse oder die Kilogramm-Masse z. B. hat ein verschiedenes Gewicht unter den verschiedenen Breitegraden; daher ist eine Arbeit von derselben Anzahl von Meter-Kilogrammen oder von derselben Anzahl von Pferdestärken in Wirklichkeit nicht dasselbe in verschiedenen Ländern; anscheinend verschiedene Arbeiten könnten daher in Wahrheit gleich sein. So beschaffene Einheiten haben folglich nichts Absolutes an sich. Dieser Mangel ist in den Systemen absoluter Einheiten beseitigt, weil man anstatt des Gewichtes des Grammes oder des Kilogrammes ihre Masse eingeführt hat.

Drittens haben die Einheiten der absoluten Systeme das Besondere, daß sie alle unmittelbar aus den Fundamentaleinheiten hervorgehen, d. h. sich bloß aus den Fundamentaleinheiten, erhoben auf verschiedene Potenzen, zusammensetzen, wie z. B. die Flächen- und Inhaltseinheiten, welche durch die Quadrate oder Kuben der Längeneinheit gebildet werden. Bezeichnet man mit L, M und T die drei Fundamentaleinheiten von Länge, Masse und Zeit, so hat man bloß diese Buchstaben und keinen weiteren Faktor in den Ausdrücken, welche die Ableitungsweise der anderen Einheiten darstellen. Die Ausdrücke, welche die verschiedenen Einheiten als Funktionen der Fundamentaleinheiten L, M und T darstellen, werden Dimensionsgleichungen genannt. Die Dimensionsgleichung $[u] = [L^x M^y T^z]$ zeigt z. B., daß die [u] sich ändert nach dem Grade x von L, nach dem Grade y von M und nach dem Grade z von T.

Diejenigen, welche zuerst in die Wissenschaft die absoluten Maße eingeführt und als Fundamentaleinheiten das Millimeter, das Milligramm und die Sekunde angenommen hatten, waren Gauß und Weber. Die britische Assoziation nahm dagegen das Meter, das Gramm, die Sekunde an, setzte aber nachher (1875) an Stelle des Meters das Zentimeter. Dieses CGS-System[1]) ist jetzt das allgemeine.

Das Zentimeter entspricht dem hundertsten Teile des Metermodelles, welches im Pariser Archive aufbewahrt wird; die Sekunde hat den Wert von $\frac{1}{24 \times 60^2}$ der mittleren Tageslänge, welche seit vielen Jahrhunderten unverändert geblieben ist. Das Gramm (nicht das Gewicht, sondern die Masse des Grammes) ist nicht (nach der theoretischen Definition) die Masse eines Kubikzentimeters destillierten Wassers bei 4° C, sondern vielmehr der tausendste Teil der Masse des Kilogramm-Modelles, welches ebenfalls im Pariser Archive aufbewahrt wird.

α) Die mechanischen Maßeinheiten.

Geschwindigkeit [v]. Bei der gleichförmigen Bewegung sowohl, wie bei der veränderlichen Bewegung, wo man einen in der unendlich kleinen Zeit durchlaufenen unendlich kleinen Weg betrachtet, hat man Geschwindigkeit $= \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$. Die Geschwindigkeit wird daher immer ausgedrückt

[1]) Immer durch die Anfangsbuchstaben der erwählten Einheiten als sein Symbol ausgedrückt (Centimeter — Gramm — Sekunden — System).



durch das Verhältnis eines Weges zu einer Zeit; folglich hat man für die Geschwindigkeitseinheit die Dimensionsgleichung

$$[v] = [L T^{-1}].$$

Beschleunigung $[\gamma]$ ist das Verhältnis der sehr kleinen Geschwindigkeit, welche einem Körper beigebracht wird, zu der sehr kleinen Zeit, in welcher ihm dieselbe beigebracht wird. Die Formel der Beschleunigungseinheit wird daher gebildet, indem man die Geschwindigkeitseinheit $[v]$ dividiert durch die Zeiteinheit T und man erhält

$$[\gamma] = [L T^{-2}].$$

Kraft [P] ist das Produkt aus Masse und Beschleunigung. Um den Ausdruck der Krafteinheit zu erhalten, wird die Beschleunigungseinheit $[\gamma]$ mit der Masseneinheit [M] multipliziert und es folgt daraus

$$[F] = [L M T^{-2}].$$

Die Krafteinheit $[L M T^{-2}]$ im CGS-Systeme heißt Dyne.

An einem Punkte der Erdoberfläche, an dem die Beschleunigung der Schwere 981 cm beträgt, wird die Masse eines Gramms mit einer Kraft von 981 Dynen, die Masse eines Kilogramms mit 981000 Dynen von der Erde angezogen.

Arbeit [A] ist das Produkt aus einer Kraft und dem zurückgelegten Wege, woraus sich

$$[A] = [L^2 M T^{-2}]$$

ergibt.

Die absolute Arbeitseinheit $[L^2 M T^{-2}]$ im CGS-Systeme wird mit dem Worte Erg bezeichnet.

Die in der Technik vielfach verwendete Arbeitseinheit des Kilogrammmeter (kgm) ist hiernach, da 1 m = 100 cm, 1 kg = 981000 Dynen entspricht, gleich $9{,}81 \cdot 10^7$ Erg.

Das mechanische Wärmeäquivalent, d. h. die Arbeit, welche derjenigen Wärmemenge äquivalent ist, die erforderlich ist, um 1 g Wasser um 1° C zu erwärmen, berechnet sich, wie folgt: Eine Kilogrammkalorie (= 1000 Grammkalorien) sind gleich 425 kgm, folglich 1 Grammkalorie = 0,425 kgm $= 0{,}425 \cdot 9{,}81 \cdot 10^7$ Erg $= 4{,}17 \cdot 10^7$ Erg.

Leistung oder Effekt ist die in einer Sekunde geleistete Arbeitsmenge oder das Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit. Die Dimension der Leistung ist sonach

$$L^2 M T^{-2} : T \text{ oder } [L M T^{-2}] \times [L T^{-1}] = L^2 M T^{-3}.$$

Als Einheit dient eine Leistung von 1 Erg in der Sekunde, das Sekundenerg. Da 1 Sekundenkilogrammeter gleich $9{,}81 \cdot 10^7$ Sekundenerg ist, so ist ein Sekundenerg gleich $\frac{1}{9{,}81} \cdot 10^{-7}$ Sekundenkilogrammmeter. In der Technik benutzt man als Maß für die Leistungen an Maschinen 75 Sekundenkilogrammeter und nennt diese Einheit eine Pferdestärke (PS). 1 PS ist demnach gleich $75 \cdot 9{,}81 \cdot 10^7 = 736 \cdot 10^7$ Sekundenerg.

β) Allgemeines über die elektrischen Maßeinheiten.

Die elektrischen Maßeinheiten unterscheidet man in elektrostatische Maßeinheiten und in elektromagnetische Maßeinheiten [1]). Den

[1]) In folgendem werden durch kleine, in eckige Klammern eingeschlossene Buchstaben die elektrostatischen Einheiten, durch große Buchstaben die elektromagnetischen Einheiten bezeichnet.



Ausgangspunkt der elektrostatischen Einheiten bildet die Menge von Elektrizität, welche, in einem Punkte oder auf einer kleinen Kugel angehäuft, eine gleiche Menge von Elektrizität in der Entfernung 1 mit der Kraft 1 zurückstößt. Den Ausgangspunkt der elektromagnetischen Einheit bildet die magnetische Quantität oder der magnetische Pol, welcher einen gleichen Pol in der Entfernung 1 mit der Kraft 1 zurücktreibt.

b) Elektrostatisches Maßsystem.

Elektrizitätsmenge [q]. Nach dem Gesetze von Coulomb (siehe Seite 7) hat man zwischen zwei gleichen Quantitäten q in der Entfernung r die Anziehungs- oder Abstoßungskraft $P = \frac{q^2}{r^2}$. Dies ergibt die Dimensionsformel

$$[q] = r \cdot \sqrt{P} = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}].$$

Potential oder elektromotorische Kraft [e]. Gemäß der Bedeutung des Potentiales wird die Maßeinheit desselben bezeichnet mit der Einheit von Elektrizitätsmenge, geteilt durch die Einheit der Entfernung oder mit [q] geteilt durch L, sonach wird

$$[e] = [L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}].$$

Kapazität [c]. Da nach Seite 8 immer Kapazität gleich q : e ist, so erhält man die Dimensionen der Einheit von Kapazität zu

$$[c] = [L],$$

d. h. die elektrostatische Kapazität ist eine lineare Größe.

Stromstärke [i]. Die Stärke eines Stromes wird bestimmt durch die Elektrizitätsmenge q, welche den Querschnitt eines Drahtes durchläuft, geteilt durch die Zeit, welche sie braucht, diesen zu durchlaufen. Um die Einheit der Stromstärke auszudrücken, wird es folglich genügen, [q] durch T zu teilen, woraus sich ergibt

$$[i] = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}].$$

Widerstand [r]. Nach dem Ohmschen Gesetze ist r gleich e : i, die Dimensionsgleichung lautet also

$$[r] = [L^{-1} T],$$

d. h. der Widerstand in elektrostatischem Maße ist das Umgekehrte einer Geschwindigkeit.

Verhältnis zwischen den elektrostatischen Einheiten der drei nebenstehenden Systeme	CGS	Millim. Milligr. Sek.	Meter-Gramm Sek.
	Systeme		
$[q] = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}]$	1	$\frac{1}{1000}$	1000
$[e] = [L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}]$	1	$\frac{1}{100}$	10
$[c] = [L]$	1	$\frac{1}{10}$	100
$[i] = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}]$	1	$\frac{1}{1000}$	1000
$[r] = [L^{-1} T]$	1	10	$\frac{1}{100}$

c) Elektromagnetisches Maßsystem.

Magnetische Quantität Q'. Unter der Einheit der magnetischen Quantität versteht man diejenige magnetische Quantität oder denjenigen magnetischen Pol, welcher einen gleichen Pol in der Entfernung 1 mit der Kraft 1 zurücktreibt. Folglich hat man für die Dimensionen eines magnetischen Poles

$$Q' = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}].$$

Stromstärke [J]. Die Stromeinheit entspricht der Elektrizitätsmenge, die jeden Querschnitt eines Stromkreises in 1 Sekunde durchläuft, und läßt sich definieren als diejenige, welche beim Durchlaufen eines Kreisbogens von der Länge 1 und vom Halbmesser 1 die Kraft 1 auf die magnetische Quantität 1, die sich in seinem Mittelpunkt befindet, ausübt[2]). Die Dimensionsgleichung lautet:

$$[J] = [L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}].$$

Widerstand [R]. Die vom Strome beim Durchgange durch einen Leiter vom Widerstande R in der Zeit t geleistete Arbeit ist durch den Ausdruck $A = J^2 R t$ gegeben, sonach ist $R = \frac{A}{J^2 t}$; folglich erhält man

$$[R] = [L T^{-1}],$$

ein Ausdruck, welcher eine Geschwindigkeit vorstellt, während das elektrostatische [r] das Umgekehrte einer Geschwindigkeit war.

Elektromotorische Kraft oder Potential [E]. Die Dimensionsgleichung folgt aus dem Ohmschen Gesetz $[E] = [J] \cdot [R]$,

$$[E] = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}].$$

Elektrizitätsmenge [Q]. Nachdem J die Menge Elektrizität ist, welche jeden Querschnitt des Stromkreises in der Zeiteinheit durchfließt, so ist die Dimensionsgleichung

$$[Q] = [L^{1/2} M^{1/2}].$$

Kapazität [C]. Aus der allgemeinen Beziehung $Q = C \cdot E$ leitet man ab

$$[C] = [Q] : [E] = [L^{-1} T^2].$$

Elektrische Leistung wird gemessen durch das Produkt aus Stromstärke und Spannung. Die Dimensionen der elektrischen Leistung sind demnach:

$$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1} \times L^{3/2} M^{1/2} T^{-2} = L^2 M T^{-3}.$$

---

[1]) In der nebenstehenden Tabelle findet man die Erklärung des so sehr verschiedenen Wertes, welcher dem höchsten Potentiale der Elektrisiermaschinen (Funken von etwa 30 Zentimeter) beigelegt wird, indem einige Schriftsteller diesen Wert zu 30, andere zu 300 und wieder andere sogar zu 80000 angeben. Die Werte 30 und 300 beziehen sich auf das MGS-System, bzw. auf das CGS-System, und beide Zahlen bedeuten denselben Wert, weil die Einheiten des ersten zehnmal größer sind als die Einheiten des zweiten. Die Einheit endlich, auf welche sich die Zahl 80000 bezieht, ist nichts anderes als das Potential eines Daniell-Elementes, nämlich 0,00374, ausgedrückt in Einheiten des CGS-Systemes, welche Zahl, mit 80000 multipliziert, sehr nahe 300 gibt.

[2]) Da der ganze Kreisumfang π mal den Durchmesser oder 2π mal den Halbmesser enthält, so hat ein Strom, welcher den ganzen Kreisumfang durchläuft, eine 6,28 mal größere Wirkung als die oben angeführte Einheit der Stromstärke. Daher wird man auch sagen können: Die Stromeinheit ist jene, welche, verwendet für einen Kreis vom Halbmesser 1, auf die magnetische Quantität 1, welche sich in seinem Mittelpunkte befindet, die Kraft von 6,28 absoluten Einheiten ausübt, oder genauer, von 2π absoluten Einheiten, d. i. (im Systeme CGS) 2π Dynen, welche $6,28 \times 0,00102 = 0,00641$ g wert sind.



Elektrische Arbeit hat die Dimensionen der Arbeit überhaupt:

$$\text{Coulomb} \times \text{Volt} = L^{1/2} M^{1/2} \times L^{3/2} M^{1/2} T^{-2} = L^2 M T^{-2}.$$

Verhältnis zwischen den elektromagnetischen Einheiten der drei nebenstehenden Systeme	CGS	Millim. Milligr. Sek.	Meter-Gramm Sek.
	Systeme		
$[Q'] = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}]$	1	$\frac{1}{1000}$	1000
$[J] = [L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}]$	1	$\frac{1}{100}$	10
$[R] = [L T^{-1}]$	1	$\frac{1}{10}$	100
$[E] = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}]$	1	$\frac{1}{1000}$	1000
$[Q] = [L^{1/2} M^{1/2}]$	1	$\frac{1}{100}$	10
$[C] = [L^{-1} T^2]$	1	10	$\frac{1}{100}$

d) Verhältnis der elektrostatischen zu den elektromagnetischen Einheiten.

Tabelle der Dimensionen der elektrostatischen Einheiten und der elektromagnetischen Einheiten und ihrer Verhältnisse:

Bezeichnung	Dimensionen der elektrostatischen Maßeinheiten	Dimensionen der elektromagnetischen Maßeinheiten	Verhältnis der elektrostatischen zu der elektromagnetischen Einheit: direkt abgeleitet	Verhältnis: mit $LT^{-1} = v$
Quantität	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^{1/2}M^{1/2}$	$L T^{-1}$	v^{+1}
Potential	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}$	$L^{-1} T$	v^{-1}
Kapazität	L	$L^{-1}T^2$	$L^2 T^{-2}$	v^{+2}
Strom	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}$	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L T^{-1}$	v^{+1}
Widerstand	$L^{-1} T$	LT^{-1}	$L^{-2} T^2$	v^{-2}

Man erkennt hier vornehmlich zwei Tatsachen:

1. daß die Verhältnisse sämtlich unabhängig sind von der Masseneinheit,

2. daß sie alle vom Werte von $L : T = v$ (Geschwindigkeit), erhoben auf Potenzen ± 1, ± 2 abhängen. Diese Zahl v, welche eine besondere Geschwindigkeit anzeigt, die sich bei allen diesen Verhältnissen wiederholt, wurde von Weber kritische Geschwindigkeit genannt. Man hat nach verschiedenen Methoden gesucht, den Zahlenwert des oben erwähnten Verhältnisses v zu bestimmen. Gordon stellt folgende Tabelle zusammen über die Ergebnisse dieser Untersuchungen:

Experimentatoren	Werte von v
Weber und Kohlrausch	3,1074 × 10^{10}
Thomson	2,825 × 10^{10}
Maxwell	2,8798 × 10^{10}
Mc. Kichan	2,93 × 10^{10}
Ayrton und Perry	2,980 × 10^{10}
Hockin	2,988 × 10^{10}
Rowland	3,0448 × 10^{10}

Gordon erachtet für am vertrauenswertesten die vier letzten Ergebnisse, deren Mittel $v = 2{,}9857 \times 10^{10}$ ist und sehr nahe gleich 3×10^{10} Zentimeter = 300000 km, was die allgemein angenommene Zahl ist. Diese entspricht sehr nahe der Geschwindigkeit des Lichtes und der Geschwindigkeit der Elektrizität selbst.

e) Technisches Maßsystem.

(Praktische elektromagnetische Einheiten.)

Man erkennt leicht, daß die Einheiten $[R] = \frac{[r]}{v^2}$, $E = \frac{[e]}{v}$ wegen des hohen Wertes von v äußerst klein sein müssen. Das [R] entspricht ungefähr dem Widerstande von $\frac{1}{20000}$ mm eines Kupferdrahtes von 1 mm Durchmesser. Ferner ist $[E] = \frac{1}{3 \times 10^{10}} [e] = 0{,}000000000033\ [e]$; wenn man nun bedenkt, daß das Potential einer Daniell-Säule 0,0037 [e] beträgt, so findet man, daß dieses ungemein schwache Potential durch 113333333 Einheiten [E] ausgedrückt werden müßte. Daraus leuchtet ein, daß man gar zuoft von vielen Tausenden und Millionen solcher Einheiten Gebrauch machen müßte, oder von Zahlen, die aus einer übermäßigen Menge von Ziffern gebildet und für die Rechnung höchst unbequem wären. Deshalb hat die britische Assoziation, um ein praktisches und rationelles System von elektrischen Maßen herzustellen, technische (praktische) Einheiten von Widerstand und von elektromotorischer Kraft festgesetzt, welche großen Vielfachen der einfachen Einheiten entsprechen, gebildet mit den Potenzen von 10, und hat aus diesen neuen praktischen Einheiten von Widerstand und von elektromotorischer Kraft die anderen Einheiten von Strom, von Quantität und von Kapazität abgeleitet. Das System der Britischen Assoziation, zuerst mit den Anfangsbuchstaben B. A. (British Association) bezeichnet, ist heutzutage ganz allgemein geworden, nachdem es, mit wenigen Abänderungen, vom internationalen Kongresse der Elektriker (1881 Paris) gutgeheißen wurde.

Die technische Widerstandseinheit, das Ohm, ist gleich 10^9 elektromagnetische Einheiten oder $3^{-2} \times 10^{-11}$ elektrostatische Einheiten. Dies heißt das theoretische Ohm, weil es um ein Weniges verschieden ist von dem durch die Britische Assoziation als Mustermaß aufgestellten. Wenig verschieden vom Ohm ist eine andere praktische Einheit, die sogenannte Siemenseinheit. Es ist der Widerstand einer Quecksilbersäule bei 0° C von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt. Das gesetzliche Ohm ist der Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 mm² Querschnitt und 106,3 cm Länge bei der Temperatur des schmelzendes Eises [1]).

Die technische Einheit der elektromotorischen Kraft, das Volt, ist gleich 10^8 elektromagnetische Einheiten oder $3^{-1} \times 10^{-2}$ elektrostatische Einheiten. Das gesetzliche Volt ist diejenige Spannung, welche zwischen

[1]) 1 Siemens = 0,94339 gesetzlichen Ohm, 1 Siemens = 0,953 Ohm B. A.
1 gesetzliches Ohm = 1,06 Siemens, 1 Ohm B. A. = 0,9899 gesetzlichen Ohm,
1 Ohm B. A. = 1,0493 Siemens, 1 gesetzliches Ohm = 1,0102 Ohm B. A.

den Enden eines Leiters von 1 Ohm Widerstand vorhanden ist, wenn beständig 1 Ampere durch denselben hindurchfließen[1]).

Die technische Einheit der Stromstärke ist das Ampere, einfach Stromeinheit genannt. Mit Bezug auf das Ohmsche Gesetz wird das Ampere bestimmt durch den Ausdruck $1\,\mathrm{A} = \frac{1\ \text{Volt}}{1\ \text{Ohm}}$, wonach der theoretische Wert 1 A gleich 10^{-1} elektromagnetische und gleich 3×10^9 elektrostatische Einheiten ist.

Das gesetzliche Ampere ist derjenige konstante Strom, welcher, durch eine Silbernitratlösung fließend, in der Sekunde 0,001118 g Silber niederschlägt.

Die technische Einheit der Elektrizitätsmenge ist das Coulomb, d. i. die durch den Strom von 1 Ampere in 1 Sekunde überführte Elektrizitätsmenge, gleich 10^{-1} elektromagnetische oder 3×10^9 elektrostatische Einheiten.

Die praktische Einheit der elektrischen Leistung, das Volt-Ampere oder das Watt, ist gleich 10^7 elektromagnetische Einheiten $= 10^7$ Sekundenerg. Da 1 PS nach Seite 27 gleich $736 \cdot 10^7$ Sekundenerg ist, so folgt 1 PS = 736 Watt.

Für die Leistung elektrischer Maschinen und Apparate oder elektrischer Anlagen wird zumeist das Hektowatt (= 100 Watt) oder das Kilowatt (= 1000 Watt) als Einheit gewählt. Da 1 PS = 0,736 Kilowatt, so ist 1 Kilowatt = 1 : 0,736 PS = 1,36 PS.

Die Arbeit, ganz gleichgültig, auf welche Weise sie geleistet wird, wird durch die Arbeitseinheit, das Erg, gemessen. Für die Zwecke der Elektrotechnik würde jedoch das Erg zu klein sein; man hat daher das Voltcoulomb, auch Joule oder Wattsekunde genannt, als praktische Einheit gewählt, welche den 10^7-fachen Betrag eines Erg ausmacht. Diese Arbeit wird geleistet, wenn die Elektrizitätsmenge von 1 Coulomb bei 1 Volt verbraucht wird.

1 Joule $= 10^7 \cdot$ elektromagnetische Einheiten $= 10^7$ Erg.

Da 1 kgm gleich $9{,}81 \cdot 10^7$ Erg (Seite 27), so ist 1 kgm = 9,81 Joule und 1 Joule $= \frac{1}{9{,}81}$ kgm.

Da 1 Grammkalorie gleich $4{,}17 \cdot 10^7$ Erg (Seite 27), so ist 1 Grammkalorie = 4,17 Joule und 1 Joule $= \frac{1}{4{,}17}$ Grammkalorien = 0,24 Grammkalorien.

In der Praxis rechnet man meist nicht mit Joule (Wattsekunden), sondern mit Wattstunden (Hektowattstunden, Kilowattstunden).

1 Wattstunde = 3600 Wattsekunden (Joule).

Die Einheit der Kapazität ist das Farad, d. i. die Kapazität eines

[1]) Im allgemeinen kann man behaupten, daß ein Volt sehr nahe der elektromotorischen Kraft eines Daniell-Elementes entspricht. In der Tat gibt sein bekanntes elektrostatisches Maß 0,00374, multipliziert mit 3×10^{10}, $\frac{0{,}00374 \times 3 \times 10^{10}}{10^8}\ \mathrm{V} = 1{,}122\ \mathrm{V}$.



Kondensators, in welchem die Ladung mit einem Coulomb zwischen den Belegungen eine Potentialdifferenz von einem Volt erzeugt.

1 Coulomb = 1 Farad $\times$ 1 V und daher 1 Farad = 10^{-9} elektromagnetische Einheiten oder = 9×10^{11} elektrostatische Einheiten. Diese Maßeinheit ist für die Praxis zu groß. Die Erdkugel mit ihrem ganzen Rauminhalte hat eine Kapazität von nur 0,707 Farad. Daher nimmt man als technische Kapazitätseinheit den millionstel Teil eines Farad, welche Mikrofarad genannt wird; 1 Mikrofarad = 10^{-15} elektromagnetische Einheiten oder 9×10^{5} elektrostatische Einheiten.

Die Dimension des Selbstinduktionskoeffizienten ist im absoluten elektromagnetischen Maßsystem eine Länge, und seine Einheit ist das Zentimeter. Als praktische Einheit der Selbstinduktion ist die Länge des Erdquadranten gewählt und diese Größe Henry genannt. 1 Henry = 10^{9} elektromagnetische Einheiten[1]).

f) Zusammenstellung.

Laufende Nr.		Symbol	Dimensionsgleichung der elektromagnetischen Einheiten	Name der Einheit im CGS-System	Um die technische Einheit zu erhalten, muß man die CGS-Einheit multiplizieren mit	Name der technischen Einheit
1	Geschwindigkeit .	v	$L T^{-1}$	—	—	—
2	Beschleunigung .	γ	$L T^{-2}$	—	—	—
3	Kraft	P	$L M T^{-2}$	Dyne	—	—
4	Arbeit	A	$L^2 M T^{-2}$	Erg	$9{,}81 \cdot 10^7$ $4{,}17 \cdot 10^7$	kgm Grammkalorie
5	Leistung oder Effekt		$L^2 M T^{-3}$	Sekundenerg	$7{,}36 \cdot 10^7$	Pferdekraft
6	Magnet. Quantität	Q′	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$	—	—	—
7	Feldstärke . . .	H	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$	—	—	—
8	Kraftlinienzahl . .	Z	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$	—	—	—
9	Stromstärke . .	J	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$	—	10^{-1}	Ampere
10	Widerstand . . .	R	$L T^{-1}$	—	10^{9}	Ohm
11	Elektromot. Kraft	E	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}$	—	10^{8}	Volt
12	Elektrizitätsmenge	Q	$L^{1/2} M^{1/2}$	—	10^{-1}	Coulomb
13	Elektr. Leistung .		$L^2 M T^{-3}$	Sekundenerg	10^{7}	Watt
14	Elektrische Arbeit		$L^2 M T^{-2}$	Erg	10^{7} $3{,}6 \cdot 10^{10}$	Joule Wattstunde
15	Kapazität . . .	C	$L^{-1} T^{2}$	—	10^{-9} 10^{-15}	Farad Mikrofarad
16	Selbstinduktionskoeffizient . .	L	L	Zentimeter	10^{9}	Henry

[1]) Als praktische Einheit des Widerstandes ist das Ohm gewählt worden (s. Seite 31). Der Widerstand hat aber die Dimension einer Geschwindigkeit, und zwar ist das Ohm die Geschwindigkeit von 1 Erdquadranten = 10^{9} cm in der Sekunde. In Anlehnung daran hat man die praktische Einheit der Selbstinduktion festgelegt.

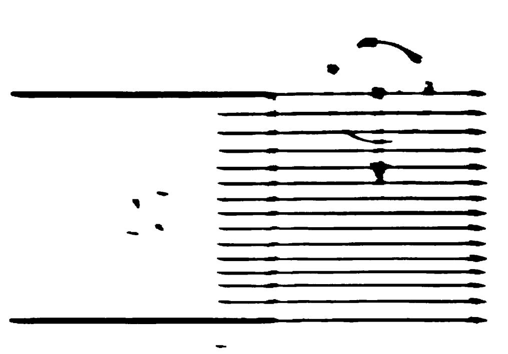
5. Erzeugung von elektromotorischen Kräften durch Kraftlinieninduktion.

a. Entstehung der elektromotorischen Kraft.

[illegible]

b. Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft.

[illegible]



[illegible]

den Kraftlinien bewegt, dann zeigen die Fingerspitzen die Richtung der induzierten EMK an.

Die verschiedenen Fälle der elektromagnetischen Induktion sind in den Figuren 45 bis 48 dargestellt.

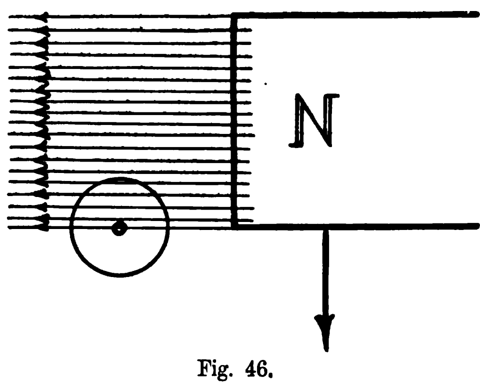


Fig. 46.

In Fig. 45 ist ein feststehender Magnet und ein beweglicher Leiter dargestellt. Wird der Leiter in der Pfeilrichtung bewegt, so schneidet er die von dem Nordpol ausgehenden Kraftlinien, wodurch in dem Leiter eine EMK erzeugt wird. Bestimmt man die Richtung dieser EMK nach dem Lenzschen Gesetz oder der Rechtehandregel, so findet man, daß der Induktionsstrom aus der Papierebene herauskommen muß.

In Fig. 46 ist ein feststehender Leiter und ein beweglicher Magnet dargestellt. Wird der Magnet in der Pfeilrichtung bewegt, so ist dies gleichbedeutend, als wenn der Magnet feststände und der Stromleiter sich im entgegengesetzten Sinne (also in der Figur nach oben) bewegte. Die induzierte EMK muß also aus der Papierebene herauskommen.

In Fig. 47 ist A ein feststehender stromdurchflossener, B ein beweglicher Leiter. B wird in der Pfeilrichtung dem Leiter A genähert. Das um A sich bildende Kraftlinienfeld hat nach Seite 14 die eingezeichnete Richtung, folglich kann man zur Bestimmung der Richtung der EMK annehmen, daß sich in dem unteren Teil der Figur der bewegliche Leiter von rechts nach links an einem oberhalb des Leiters befindlichen Nordpol vorbeibewegt. (Induzierte EMK aus der Papierebene heraustretend [1]).

Fig. 47. (Rechtehandregel.)

In Fig. 48 sind zwei feststehende Leiter A und B dargestellt. In dem Leiter A kann durch den Schalter S ein Strom I ein und aus geschaltet werden. Sobald der Strom I eingeschaltet wird, bildet sich um den Leiter A herum ein allmählich anschwellendes Kraftlinienfeld, der Leiter B wird von diesen sich ausbreitenden Kraftlinien geschnitten. Die Folge davon ist, daß in B eine EMK induziert

[1]) Zwei stromdurchflossene Leiter A und B, welche entgegengesetzt gerichtete Ströme führen, üben aufeinander eine abstoßende Kraft (also eine Kraft, die der Bewegungsrichtung in Fig. 47 entgegengesetzt gerichtet ist) aus.

wird. Um deren Richtung zu bestimmen, muß man beachten, daß die Kraftlinienbewegung eine solche ist, als ob ein Nordpol sich von links nach rechts an dem Leiter B vorbeibewegte. Die EMK ist also nach der Rechtehandregel (Bewegung des Leiters gegenüber dem Nordpol: von rechts nach links!) aus der Papierebene heraus gerichtet (wie bei Fig. 47).

Sobald der Strom I ausgeschaltet wird, verschwinden die Kraftlinien um den Leiter A auf demselben Wege, auf welchem sie entstanden sind (sie kriechen wieder in den Leiter A zurück). Der Leiter B wird also jetzt wieder von derselben Anzahl Kraftlinien geschnitten wie vorher, aber in entgegengesetzter Richtung, so daß jetzt auch die induzierte EMK die entgegengesetzte Richtung haben muß (in die Papierebene hinein).

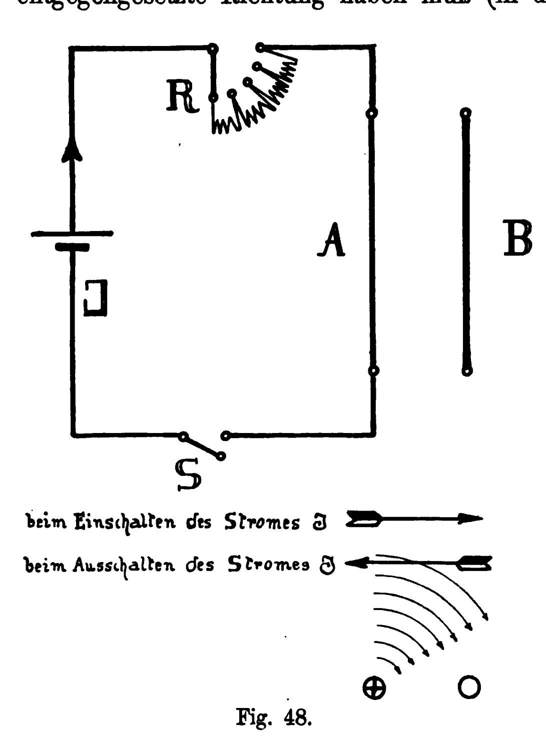


Fig. 48.

Verändert man in Fig. 48 die Stromstärke I durch den Regulierwiderstand R, so tritt (nach Seite 13) ebenfalls eine Kraftlinienänderung (Kraftlinienbewegung) auf, und zwar bei Verstärken des Stromes (entsprechend dem Zuschalten neuer Stromeinheiten) in demselben Sinne, wie oben für das Einschalten angegeben, bei Schwächen des Stromes (entsprechend dem Abschalten von Stromeinheiten) in demselben Sinne, wie oben für das Ausschalten des Stromes angegeben.

c) Größe der elektromotorischen Kraft.

Wenn ein geradliniger Leiter von der Länge l cm sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit von v cm pro Sekunde in einem homogenen Magnetfelde von der Stärke H stets senkrecht zu der Richtung der Kraftlinien bewegt, so ist die elektromotorische Kraft E in absoluten Einheiten

$$E = H \cdot l \cdot v.$$

Die Einheit der Spannung wird also induziert, wenn ein Leiter von der Länge 1 cm mit der Geschwindigkeit 1 cm pro Sekunde ein Magnetfeld von der Stärke einer Kraftlinie pro cm² schneidet.

Ist ein homogenes Magnetfeld von insgesamt Z Kraftlinien so vorhanden, daß der Leiter bei seiner Bewegung sämtliche Z Kraftlinien schneiden muß, und braucht der Leiter T Sekunden, um dieses Magnetfeld zu durchschneiden, so ist die durchschnittlich in der Sekunde geschnittene Kraftlinienzahl gleich $\frac{Z}{T}$. Andererseits ist das Produkt $l \cdot v$ (Fig. 49) nichts anderes, als die Fläche (in cm²), die von dem Leiter in der Sekunde bestrichen wird. Das

Produkt $H \cdot l \cdot v$ in der Formel für die EMK ist also die Anzahl Kraftlinien, welche durch die Fläche $l \cdot v$ hindurchtreten, die also von dem Leiter in der Sekunde geschnitten werden.

Es ist also

$$E = H \cdot l \cdot v = \frac{Z}{T}$$ [1],

d. h. die elektromotorische Kraft ist gleich Kraftlinienschnittzahl pro Sekunde.

Da nach Seite 32 das Volt gleich 10^8 absoluten Einheiten entspricht, so ist

$$E = H \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8}$$
$$= \frac{Z}{T} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

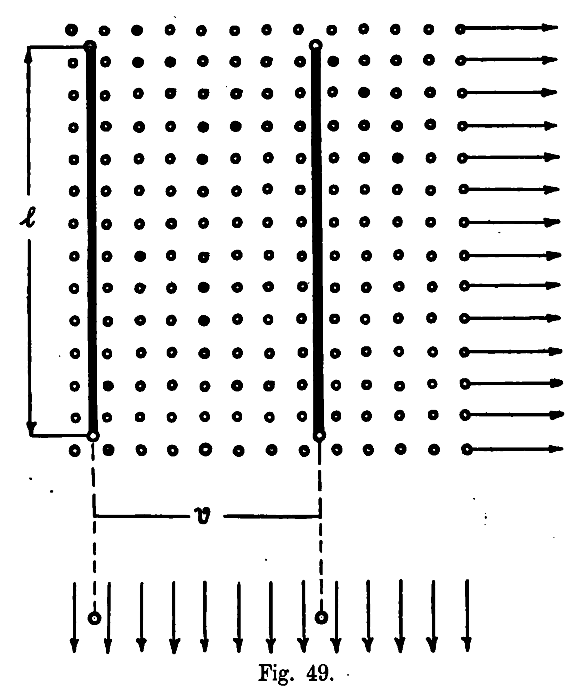


Fig. 49.

Ist das aus Z Kraftlinien bestehende Magnetfeld, durch welches sich der Leiter in T Sekunden hindurchbewegt, kein homogenes Feld, d. h. ändert sich die Kraftliniendichte beliebig (z. B. nach der Kurve Fig. 51), so muß man zur Ermittlung der mittleren EMK die Zeit T in eine genügend große Anzahl (n) gleiche Teile (τ) teilen. Die während eines solchen kleinen Zeitabschnittes induzierte EMK kann man als konstant ansehen, während die in den verschiedenen Zeitelementen induzierten EMKK im allgemeinen voneinander verschieden sind. Man hat also n verschiedene EMKK $e_1, e_2, e_3 \ldots, e_n$. Ihr arithmetischer Mittelwert

$$e_m = \frac{e_1 + e_2 + e_3 + \ldots - e_n}{n}$$

heißt die mittlere elektromotorische Kraft.

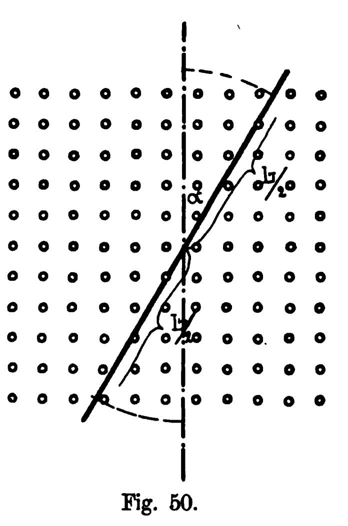


Fig. 50.

In dem ersten Zeitelement soll der Leiter Z_1, in dem zweiten $Z_2 \ldots$, in dem n-ten Zeitelement Z_n Kraftlinien schneiden. Die induzierten EMKK sind dann

[1]) Liegt der Leiter von der Gesamtlänge L nicht so, wie in Fig. 49 angegeben, sondern so, wie Fig. 50 andeutet, so ist der Wert von l, der in diese Formel und in den daraus abgeleiteten Formeln einzusetzen ist: $l = L \cdot \cos \alpha$. Das bedeutet, daß bei dieser Leiterlage die wirkliche Leiterlänge nicht ausgenutzt wird, und daß man die maximale EMK bei einer bestimmten Leiterlänge L erhält, wenn $\alpha = 0$ ist, d. h. der Leiter senkrecht zu der Kraftlinienrichtung steht.

$$e_1 = \frac{Z_1}{\tau} \cdot 10^{-8} \text{ Volt},$$
$$e_2 = \frac{Z_2}{\tau} \cdot 10^{-8} \quad \text{„}$$
$$e_3 = \frac{Z_3}{\tau} \cdot 10^{-8} \quad \text{„}$$
$$\vdots$$
$$e_n = \frac{Z_n}{\tau} \cdot 10^{-8} \quad \text{„}$$

$$e_1 + e_2 + e_3 + \ldots e_n = \frac{10^{-8}}{\tau} \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_3 \ldots Z_n) = \frac{10^{-8}}{\tau} \cdot Z,$$

$$e_m = \frac{e_1 + e_2 + e_3 \ldots e_n}{n} = \frac{Z}{n\tau} \cdot 10^{-8} = \frac{Z}{T} \cdot 10^{-8} \text{ Volt } ^{1)}.$$

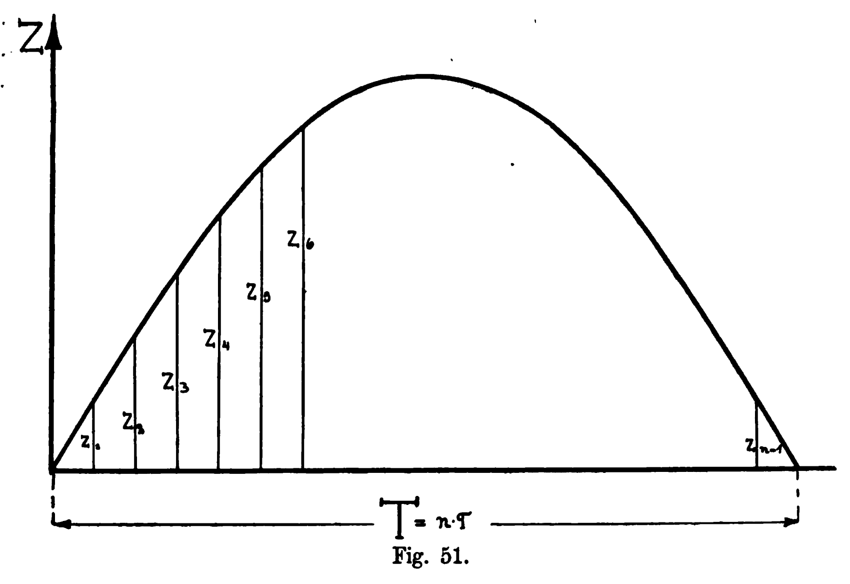


Fig. 51.

Ist das aus Z Kraftlinien bestehende Magnetfeld zwar homogen, bewegt sich aber der Leiter von der Länge l nicht senkrecht zu der Richtung der Kraftlinien, sondern nach Fig. 52 im Kreise um eine Achse mit der Geschwindigkeit v cm pro Sekunde, so ist die in der Zeiteinheit geschnittene Kraftlinienzahl in jedem Zeitteilchen eine andere. Bewegt sich der Leiter l im Punkte A parallel zu den Kraftlinien, so ist die Zahl der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien gleich Null, die Zahl der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien erreicht ihren Maximalwert im Punkte C, wo der Leiter die Kraftlinien senkrecht schneidet. Auf dem Wege von A nach C verändert sich die Zahl der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien fortwährend zwischen den Grenzen Null und einem bestimmten Maximum.

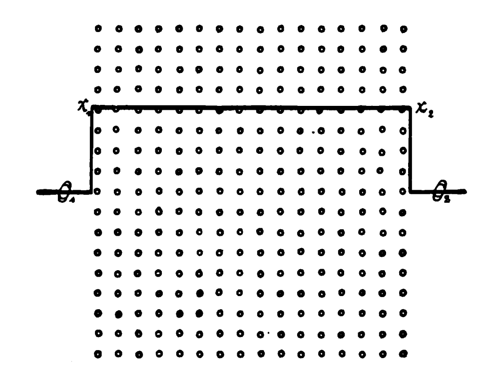
[1]) Diese Gleichung gilt ganz allgemein für die Größe der durch Kraftlinienbewegung induzierten EMK, also für Dynamomaschinen, Transformatoren, Induktoren usw. In dem vorliegenden Abschnitt werden nur die für die Primärerzeugung einer induzierten EMK in Dynamomaschinen wichtigen Gesetze abgeleitet. Transformatoren usw., also die Erzeugung sekundärer EMK, sind in Heft 2 behandelt.

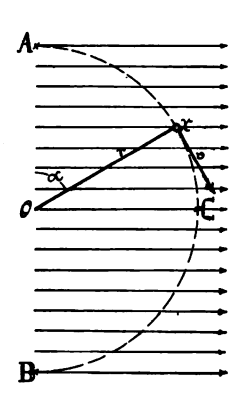
Beschreibt der Leiter in der Zeit T den Halbkreis AXCB (Fig. 52), so ist die in der Zeit T geschnittene Kraftlinienzahl $Z = 2\,r \cdot l \cdot H$.

Ferner ist $v \cdot T = r \cdot \pi$, folglich $T = \frac{r\,\pi}{v}$.

Die mittlere induzierte EMK

$$e_m = \frac{Z}{T} \cdot 10^{-8} = \frac{2\,r \cdot l \cdot H}{\frac{r \cdot \pi}{v}} \cdot 10^{-8} = \frac{2}{\pi} \cdot l \cdot H \cdot v \cdot 10^{-8}.$$





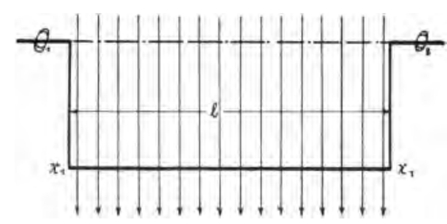


Fig. 52.

Die maximale induzierte EMK E_{max} entsteht in dem Augenblick, in welchem der Leiter die Kraftlinien senkrecht schneidet, also im Punkte C, dort ist nach Seite 36

$$E_{max} = l \cdot H \cdot v \cdot 10^{-8},$$

folglich wird

$$e_m = \frac{2}{\pi} \cdot l \cdot H \cdot v \cdot 10^{-8} = \frac{2}{\pi} \cdot E_{max}.$$

Im Punkte X (Winkel α vom Ausgangspunkt A entfernt) ergibt sich die momentane EMK (der Momentanwert e der EMK) aus folgender Betrachtung:

Der Leiter X von der Länge l bewegt sich in einer Sekunde mit der Geschwindigkeit v cm pro Sekunde von X nach D in der durch den Winkel α bestimmten Richtung (Fig. 53).

Die Zahl der in dieser Zeit geschnittenen Kraftlinien ist $l \cdot H \cdot XF$. Da XF in dem Dreieck XFD gleich ist $XD \cdot \sin\alpha$, so ist die Zahl der geschnittenen Kraftlinien gleich $l \cdot H \cdot XD \cdot \sin\alpha$ oder, da die Strecke XD gleich v ist, gleich $l \cdot H \cdot v \cdot \sin\alpha$, und die EMK gleich $l \cdot H \cdot v \cdot \sin\alpha \cdot 10^{-8}$ Volt.

Da $l \cdot H \cdot v \cdot 10^{-8} = E_{max}$, so ist der Momentanwert der EMK

$$e = E_{max} \cdot \sin\alpha.$$

Der Leiter braucht die Zeit T, um den Weg von $r \cdot \pi$ zurückzulegen, und t, um den Bogen $AX = \alpha \cdot r$ zurückzulegen. Folglich kann man setzen: $t/T = \alpha/\pi$ und somit $\alpha = \frac{t}{T} \cdot \pi$ und

$$e = E_{max} \cdot \sin \frac{t}{T} \cdot \pi.$$

Da $\alpha \cdot r = v \cdot t$, so ist $\sin \alpha = \sin \frac{v \cdot t}{r}$ und

$$e = E_{max} \cdot \sin \frac{v \cdot t}{r}.$$

Dabei ist $\frac{v}{r} = \omega$ die Winkelgeschwindigkeit (in cm pro Sekunde), das ist die Geschwindigkeit, mit der sich ein Radiusvektor (OX in Fig. 52) um eine Achse (O) dreht.

Es wird also

$$e = E_{max} \cdot \sin \omega\, t.$$

Schneiden die Z Kraftlinien nicht nur einen Leiter, sondern gleichzeitig y hintereinandergeschaltete Leiter, so wird die gesamte EMK ymal größer, also

$$e_m = \frac{Z \cdot y}{T} \cdot 10^{-8}\ \text{Volt}.$$

In der vorstehenden Formel bedeutet T die Zeit in Sekunden, welche ein Leiter braucht, um in Fig. 52 einen Kreisbogen von 180° ($= \pi r$) zu beschreiben. Man kann sich die Sache aber auch so vorstellen, als ob der Leiter in Fig. 52 sich vor einer Magnetpolfläche von der Größe $2r \cdot l$ vorbeibewegt und dabei die sämtlichen von diesem Pol ausgehenden Kraftlinien (Z) geschnitten hat (Fig. 54).

Man kann also $e_m = \frac{Z}{T} \cdot 10^{-8}$ Volt als diejenige EMK definieren, welche entsteht, wenn ein Leiter an einer Z Kraftlinien aussendenden Polfläche vorbeigeführt wird und dazu eine Zeit von T Sekunden erforderlich ist.

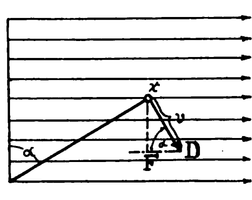


Fig. 53.

Bei einer Umdrehung des Leiters um die Achse wird der Leiter von 2Z Kraftlinien geschnitten, einmal von den in den Südpol eintretenden und ein zweites Mal von den aus dem Nordpol austretenden.

Die bei einer Umdrehung induzierte EMK ist demnach gleich

$$e_m = \frac{2Z}{T} \cdot 10^{-8}\ \text{Volt}.$$

Macht der Leiter nicht eine Umdrehung in der Sekunde, sondern $\frac{n}{60}$ Umdrehungen (n = Umdrehungszahl pro Minute), so ist die induzierte EMK, da $T = \frac{60}{n}$,

$$e_m = \frac{2Z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8}\ \text{Volt},$$

das ist also die in jedem einzelnen Leiter induzierte EMK, wenn der Leiter bei einer Umdrehung an 2 Polen (d. h. 1 Polpaar) vorüberzieht. Ist die Polpaarzahl, welche längs des Weges des Leiters angeordnet ist, gleich p, d. h. die Polzahl $= 2p$, so ist die in jedem Leiter erzeugte EMK

$$e_m = \frac{2p \cdot Z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

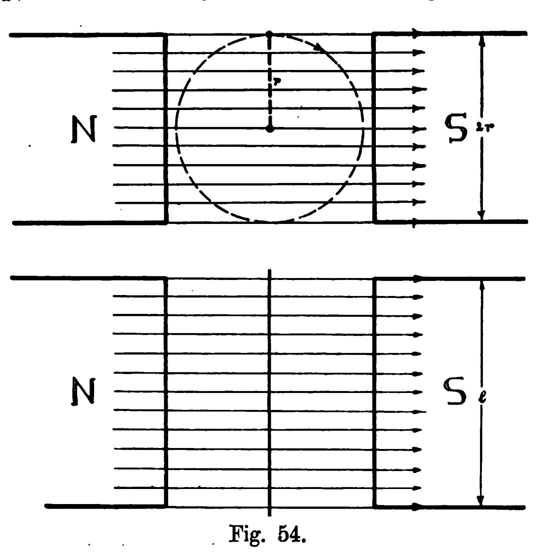


Fig. 54.

Auf der vorstehend besprochenen elektromagnetischen Induktion beruhen die Dynamomaschinen. Die EMK einer Dynamomaschine hängt davon ab, wie die auf dem sogenannten Anker untergebrachten Ankerleiter (von der Zahl z) geschaltet sind (siehe Abschnitt 8b).

Man erkennt aus Fig. 54 ohne weiteres, daß die EMK bei der Drehung um die ersten 180° aus der Papierebene heraus gerichtet ist, daß aber bei der Drehung um die zweiten 180° die Richtung der EMK die umgekehrte sein muß. Man erhält also in dem Leiter eine Wechselspannung, die EMK wechselt bei jedem Polwechsel auch ihre Richtung.

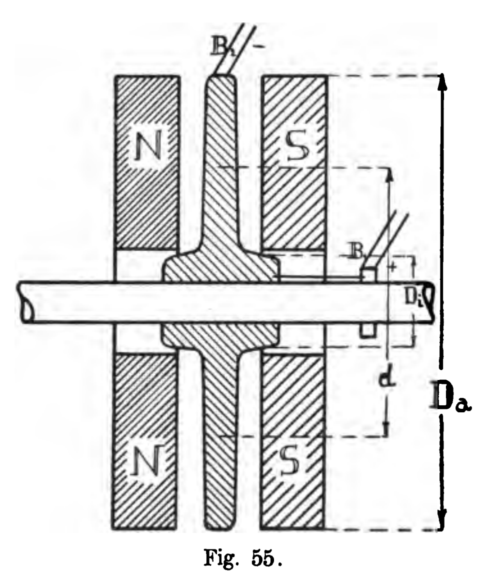


Fig. 55.

Läßt man dagegen (Fig. 55) in einem zweipoligen magnetischen Felde, dessen beide ringförmige Pole einander konzentrisch gegenüberstehen (in einem sogenannten unipolaren Felde), eine konzentrische Kreisscheibe aus leitendem Material rotieren, so wird eine radialgerichtete EMK entstehen; denn in jedem Teilchen der Scheibe, welche bei der Rotation von Kraftlinien geschnitten wird, entsteht eine EMK, welche von der Kraftlinienschnittzahl pro Sekunde abhängig ist. Nun ist offenbar die Kraftlinienschnittzahl pro Sekunde am Rande eine größere als nahe am Zentrum oder im Zentrum selbst, wo sie Null ist; denn die Kraftlinienschnittzahl ist von der Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe an den betreffenden Stellen abhängig. Dementsprechend ändert sich die elektrische Spannung von außen nach innen, d. h. in radialer Richtung, und, wenn durch Anlegen von Bürsten B_1 und B_2 ein geschlossener Stromkreis gebildet wird, so muß ein elektrischer Strom in radialer Richtung, und zwar immer in Richtung vom Punkte des höchsten

zum Punkte des niedrigsten Potentiales fließen (direkte Gleichstromerzeugung).

Die Berechnung der in der Scheibe bei der Rotation induzierten EMK kann geschehen nach der Formel auf Seite 37

$$E = H \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

l ist hier gleich $\frac{D_a - D_i}{2}$. Rechnet man D_i (für Nabe und Welle) ungefähr $0{,}2 D_a$, so ist

$$l = 0{,}4 D_a.$$

Der mittlere Durchmesser d der Scheibe ist dann

$$d = 0{,}2 D_a + 0{,}4 D_a = 0{,}6 D_a.$$

Die mittlere Geschwindigkeit desselben

$$v = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{0{,}6 \cdot D_a \cdot \pi \cdot n}{60} \text{ cm/sek},$$

wenn n die Umdrehungszahl der Scheibe pro Minute bedeutet und D_a in cm eingesetzt wird.

Die induzierte EMK ist

$$E = H \cdot 0{,}4 \cdot D_a \cdot \frac{0{,}6 \cdot D_a \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$= 0{,}013 \cdot H \cdot D_a^2 \cdot n \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$ [1]).

6. Erzeugung von elektromotorischen Kräften durch galvanische Elemente (Primärelemente).

Eine Kombination aus einer oder mehreren Flüssigkeiten und zwei Metallen nennt man ein galvanisches Element. In jedem offenen (d. h. nicht durch einen äußeren Stromkreis geschlossenen) galvanischen Elemente haben die beiden Metalle einen bestimmten Spannungsunterschied, der nur von der Natur der Metalle und Flüssigkeiten, aber nicht von der Größe und Form der Metalle oder der Menge der Flüssigkeiten abhängt. Man bezeichnet diesen bestimmten Spannungsunterschied als die elektromotorische Kraft des Elementes.

Volta nahm an, daß die bloße Berührung der Metalle und der Flüssigkeiten die Ursache dieser Elektrizitätserzeugung sei und bezeichnete sie daher als Kontaktelektrizität. In Wirklichkeit ist es aber nicht die

---

[1]) Eine Scheibe von 150 cm Durchmesser würde also bei einer minutlichen Umdrehungszahl von 2000 und bei einer Feldstärke von 15000 Kraftlinien pro Quadratzentimeter eine EMK von

$$E = 0{,}013 \cdot 15000 \cdot 150^2 \cdot 2000 \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$
$$= \text{rund } 88 \text{ Volt liefern.}$$

Bei 500 cm Durchmesser und 600 Umdrehungen wird

$$E = 0{,}013 \cdot 15000 \cdot 500^2 \cdot 600 \cdot 10^{-8} = \text{rund } 290 \text{ Volt.}$$

Die Umfangsgeschwindigkeit beträgt im ersten Falle $\frac{1{,}5 \cdot \pi \cdot 2000}{60}$ m/sek, d. s. 158 m, und im zweiten Falle $\frac{5{,}0 \cdot \pi \cdot 600}{60}$ m/sek, also ebenfalls 158 m. Höher wie 200 m/sek darf man mit der Umfangsgeschwindigkeit aus Festigkeitsrücksichten nicht gehen.

bloße einflußlose Berührung, sondern es sind die chemischen Vorgänge, die Auflösung der Metalle in der Flüssigkeit, welche die Spannungsunterschiede hervorriften.

Bei der Berührung eines Metalles mit einer Flüssigkeit entsteht eine Kraft (elektrische Scheidungskraft genannt), welche auf Beiden Elektrizität, und zwar auf dem Metall die entgegengesetzte, wie auf der Flüssigkeit, entwickelt und dadurch bewirkt, daß die Spannung des Metalles und der Flüssigkeit voneinander verschieden wird.

Die Scheidungskraft[1]) beträgt z. B.:

Magnesium	Magnesiumsulfat	= — 1,239	Volt
Aluminium	Aluminiumsulfat	= — 1,040	"
Zink	Zinksulfat	= — 0,524	"
Kadmium	Kadmiumsulfat	= — 0,162	"
Eisen	Eisensulfat	= + 0,093	"
Kupfer	Kupfersulfat	= + 0,515	"
Quecksilber	Quecksilbersulfat	= + 0,980	"
Silber	Silbersulfat	= + 0,974	"

Taucht eines dieser Metalle nicht in die entsprechende Sulfatlösung, sondern in Schwefelsäure, so bildet sich rein chemisch in der Nähe gleich das entsprechende Sulfat. Die obigen Zahlen gelten also auch für den Fall, daß die betreffenden Metalle in Schwefelsäure gestellt werden.

Die obigen Zahlen besagen also, daß z. B. an der Grenzfläche von Zink und Zinksulfat immer ein Spannungsunterschied von 0,524 Volt entsteht und zwar so, daß das Zink dabei die niedrigere, die Flüssigkeit die höhere Spannung besitzt. Umgekehrt hat das Kupfer in Berührung mit Kupfersulfat die höhere Spannung, und zwar eine um 0,515 Volt höhere als die Flüssigkeit. Der Spannungsunterschied zwischen dem Zink und dem Kupfer muß also $0,524 + 0,515 = 1,039$ Volt betragen (Daniellelement).

Bringt man zwei Metalle zusammen in eine Flüssigkeit, so wird das eine Metall negativ elektrisch, das andere positiv elektrisch, und zwar bleibt immer dasjenige Metall, welches durch seine eigene Scheidungskraft stärker negativ elektrisch wurde, auch in diesem Falle negativ.

Die gesamte Leistung L eines aus den Metallen M_1 und M_2 und den Flüssigkeiten F_1 und F_2 bestehenden Elementes kann durch die Gleichung dargestellt werden:

$$L = \text{Stromstärke} \times \text{Spannung} = J \cdot (M_1 | F_1 + F_1 | F_2 + F_2 | M_2 + M_2 | M_1).$$

Die Scheidungskraft bei der Berührung zweier Metalle $(M_2 | M_1)$ und zweier Flüssigkeiten $(F_1 | F_2)$ ist fast gleich Null. Die Leistung eines galvanisches Elementes rührt also nahezu ausschließlich von den chemischen und physikalischen Prozessen her, die sich an den Berührungsstellen der Metalle und der Flüssigkeiten vollziehen. Der wichtigste Vorgang ist die Auflösung des Metalles, welches den negativen Pol des Elementes bildet[2]).

---

[1]) Man bezeichnet die Scheidungskraft zwischen zwei Körpern gewöhnlich dadurch, daß man sie nebeneinander schreibt und dazwischen einen vertikalen Strich macht. Ist die betreffende Scheidungskraft positiv, so heißt das, der vorangehende Körper bekommt höhere Spannung als der nachfolgende; ist sie negativ, so hat der vorausgehende die geringere Spannung.

[2]) Die durch den Strom sich abscheidenden Stoffe heißen Ionen, der zu zerlegende Stoff heißt Elektrolyt, die Eintrittsstelle des Stromes Anode, die Austrittsstelle Kathode, der dort abzuscheidende Stoff Kation, der andere Anion. Der Prozeß selbst trägt den Namen Elektrolyse.

Wird ein Metall aufgelöst, so heißt dieses die Lösungselektrode; in diese strömt die negative Elektrizität, von ihr weg geht die positive Elektrizität in die Flüssigkeit, aus welcher sie durch die zweite Elektrode, die Ableitungselektrode, in den äußeren Stromkreis strömt, welcher beide Pole (so nennt man die über die Flüssigkeit ragenden Teile der Elektroden) verbindet.

Die Lösungselektrode nennt man auch positive Elektrode (sie bildet den negativen Pol), die Ableitungselektrode negative Elektrode (sie bildet den positiven Pol), da man sich in der Flüssigkeit den Strom von der positiven zur negativen Elektrode fließend denkt.

Auf die elektrochemischen Vorgänge in den galvanischen Elementen und auf das Wesen der Polarisation [1]) in den Elementen wird im Abschnitt 15 kurz eingegangen werden, hier soll nur die Zusammensetzung der gebräuchlichsten Elemente kurz besprochen werden.

Als auflösbares Metall wird fast ausschließlich Zink (oder Zink mit Quecksilberüberzug [2]) benutzt. Als positiven Pol des Elementes wählt man am besten einen Elektrizitätsleiter, der von den chemischen Prozessen, die sich in der Flüssigkeit und an dem Pole vollziehen, in keiner Weise angegriffen werden. Da die Elektrode gleichzeitig eine möglichst große Oberfläche besitzen soll, sind auch aus künstlicher Kohle gepreßte Platten oder Zylinder, oder mit Platinschwamm überzogene Platten geeignet.

Als Elektrolyt (welcher dazu dient, das Zink aufzulösen), benutzt man zumeist reine, verdünnte Schwefelsäure vom spez. Gewicht 1,15, oder auch verdünnte Salzsäure.

Als depolarisierende Substanz [1]) kann jeder Stoff dienen, welcher imstande ist, den durch die Elektrolyse entstehenden Wasserstoff zu binden; ganz besonders Körper, welche reich an Sauerstoff oder Chlor und geneigt sind, diese Stoffe abzugeben, z. B. Mangansuperoxyd (Braunstein), Bleisuperoxyd, Kupferoxyd, Salpetersäure, Chromsäure, Chlorwasser, Königswasser, Chlorsilber und Kupfersulfat. Benutzt man flüßige depolarisierende Substanzen, so muß man dieselben meist durch poröse Tonzellen von dem Elektrolyten trennen, weil sie das Zink auflösen würden, auch wenn kein Strom vom Element erzeugt wird. Solche Tonzellen haben aber den Nachteil, daß sie den inneren Widerstand nicht unerheblich vergrößern. Für Zellen, die nicht von ihrem Standorte entfernt werden brauchen, kann man auch die beiden Flüssigkeiten infolge ihrer verschiedenen Dichte ohne Zwischenschicht übereinander ausbreiten, wenn sie nicht etwa die Neigung haben, sich durch Diffusion rasch zu vermengen oder gar sich miteinander zu verbinden.

Bei den Trockenelementen ist der Elektrolyt eine feuchte Paste, häufig von Chloriden. Der Depolarisator ist ebenfalls fest und meist ein Oxyd oder Chlorid, oder die Depolarisation geschieht durch den Sauerstoff der Luft. Die feuchte Paste wird meist bereitet durch Beimischung eines

---

[1]) Unter Polarisation versteht man eine gegenelektromotorische Kraft, welche in den Elementen infolge des Auftretens von Sauerstoff (am negativen Pol) und ganz besonders von Wasserstoff (am positiven Pol) hervorgerufen wird. Die Bestrebungen der Elektrotechnik sind daher besonders darauf gerichtet gewesen, den ausgeschiedenen freien Wasserstoff zu binden und dadurch die Wirkungen der Polarisation abzuschwächen. Die Mittel, welche angewendet werden, um diesen Zweck zu erreichen, nennt man depolarisierende Mittel. Man muß die Ableitungselektrode möglichst groß und porös machen, die Flüssigkeit durch Bewegung erneuern oder dem Sauerstoff der Luft einen leichten Zutritt gestatten.

[2]) Amalgamiertes Zink.



porösen, trockenen Körpers zum Elektrolyten, z. B. Sägemehl, Asbestfaser, Sand, Kieselguhr, Gips, Tonerdehydrat, Kieselsäurehydrat.

Man kann die Primärelemente in zwei Hauptarten einteilen:

a) die konstanten Elemente, welche längere Zeit hindurch einen gleichbleibenden Strom geringerer Stärke geben (z. B. Meidinger Ballon-Element, Callaud-Element, Daniell-Element, Normal-Elemente usw.) und

b) die inkonstanten Elemente, welche auf kurze Zeit einen stärkeren Strom abgeben können (z. B. Leclanché-Element, Standkohlen- oder Fleischer-Element, Beutel-Element von Siemens & Halske usw).

Ferner kann man die Elemente nach der Art der Depolarisation in folgende Gruppen einteilen:

a) Elemente, bei welchen der Sauerstoff der Luft depolarisierend wirkt (Maiche-Element),

b) Elemente mit einer Flüssigkeit und einem depolarisierend wirkenden Metalloxyd. (Lecanché-Element, Lalande-Chaperon-Cupron-Element, Elemente mit Bleisuperoxyd).

c) Elemente mit Depolarisation durch Sauerstoffsäuren (Grove-Element, Bunsen-Element, Eisen-Element, Chromsäure-Element),

d) Elemente mit Depolarisation durch Ausscheiden von Metallen an Stelle des Wasserstoffes (Daniell-Element, Callaud-Element, Meidinger-Element, Quecksilber-Element, Normalelement),

e) Elemente mit Depolarisation durch Chlor und Chloride (Chlor-Element, Chlorsilber-Element, Skriwanowsche Quecksilber-Element).

Die nachstehende, der „Hütte" entnommene Tabelle gibt die Zusammensetzung und elektromotorische Kraft der wichtigsten Elemente in übersichtlicher Darstellung:

Name	Lösungs-elektrode	Lösungsflüssigkeit	Ab-leitungs-elektrode	Depolarisierende Körper	Elek-tromot Kraft Volt
Daniell[1])	amalg. Zink	Schwefelsäure 1 : 12	Kupfer	Kupfervitriol, gesättigt	0,97
Daniell[1])	amalg. Zink	Schwefelsäure 1 : 4	Kupfer	Kupfervitriol, gesättigt	1,068
Daniell[1])	amalg. Zink	Chlornatrium 1 : 4	Kupfer	Kupfervitriol, gesättigt	1,05
Daniell[1])	amalg. Zink	Zinkvitriol	Kupfer	Kupfervitriol	0,94
Siemens (Papp-element)	amalg. Zink	Papiermasse mit Schwefelsäure durchknetet	Kupfer	Kupfervitriol	0,9 bis 1,1
Krüger	Zink	Zinkvitriollösung	Ver-kupferte Bleiplatte	Kupfervitriol	1,008
Meidinger	amalg. Zink	Bittersalzlösung, gesättigt	Blei	Kupfervitriol, gesättigt	0,952
Grove[1])	amalg. Zink	Schwefelsäure 1 : 12	Platin	Salpetersäure v. 1,33 spez. Gewicht	1,79
Bunsen[1])	Zink	Schwefelsäure 1 : 12	Kohle	Rauchende Salpeter-säure	1,88
Bunsen	Zink	Schwefelsäure 1 : 15 bis 20	Kohle	12 GT Kalium-bichromat 25 GT Schwefelsäure 100 GT Wasser	2,03

[1]) Die Elemente haben Tonzelle.

Name	Lösungs-elektrode	Lösungsflüssigkeit	Ab-leitungs-elektrode	Depolarisierende Körper	Elek-tromot. Kraft Volt
Bunsen-Tauchelement	amalg. Zink	= dem depolarisierenden Körper	Kohle	16 GT Kalium-bichromat 37 GT reine Schwefelsäure 100 GT Wasser	2,3
Leclanché-(Fleischer-Standkohlen-element)	amalg. Zink	Salmiaklösung	Kohle mit Braunstein	Salmiaklösung	1,47
Lalande und Chaperon	Zink	Kalilauge oder Pottaschelösung von 30 bis 40%	Eisen	—	1,0

Ein besonders wichtiger Faktor bei Beurteilung der Elemente ist der innere Widerstand derselben. Dieser hängt von der Beschaffenheit der verwendeten Materialien, der Konzentration der Lösung, der Temperatur, von den Abmessungen der Elemente, der Beschaffenheit der Tonzellen, sowie der zur Verwendung kommenden Stromstärke ab. Der innere Widerstand muß daher beim Gebrauch jedesmal besonders bestimmt werden [1]), die nachstehenden Zahlenangaben sollen nur einen ungefähren Anhalt über die Größenordnung des inneren Widerstandes einiger Elemententypen geben.

Bezeichnung des Elementes	Innerer Wider-stand Ohm	Ge-wicht kg	Maße in Millimetern		
			Durchmesser	Höhe ohne Klemmen	Höhe mit Klemmen
Meidinger Ballon-Element . . .	3—3,5	3,5	100 mm	235	235
Großes Leclanché	ca. 0,4	3,0	100 × 100 mm	260	310
Mittleres Leclanché	ca. 6,0	1,5	90 × 90 mm	145	185
Großes Papp-Element	4—6	2,9	115 mm	160	210
Kleines Papp-Element	6—10	0,85	75 mm	110	145
Bunsen-Element	0,2	4,2	115 mm	170	270
Amerikanisches Element . . .	1,5—2	7,0	155 mm	180	240
Daniell-Element	ca. 1,0	3,0	115 mm	160	180
Fleischer-Element	ca. 0,4	2,4	105 mm	155	220

Der innere Widerstand guter Trockenelemente beträgt bei kleinen Elementen von weniger als 0,5 kg Gewicht etwa 0,5—0,6 Ohm, bei etwas größeren von 0,5—1 kg etwa 0,15—0,25 Ohm, und bei den großen von über 1 kg Gewicht meist 0,10 bis 0,15 Ohm.

Die Normalelemente dienen für Gleichstrommessungen als Spannungsnormalen. Selbstverständlich kann bei einem derartigen Normalelemente, wie bei allen galvanischen Elementen, nur dann von einer konstanten EMK unter sonst gleichen Verhältnissen die Rede sein, wenn es sich im stromlosen Zustande befindet, weshalb man bei Spannungsvergleichungen mit solchen Normalelementen am zweckmäßigsten Methoden verwendet, bei welchen das Normalelement kompensiert (stromlos) ist [2]).

In der elektrotechnischen Meßtechnik finden ganz besonders zwei Normalelemente Anwendung, nämlich die Elemente von Clark und die von Weston, doch kann in gewissem Sinne auch noch das Daniellelement als Normalelement dienen.

[1]) Die dafür gebräuchlichsten Methoden sind in Heft 6 gegeben.
[2]) Näheres darüber siehe Heft 7.



Bei der von Feußner angegebenen Form des Clark-Elementes der Phys.-techn. Reichsanstalt dient als positive Elektrode ein amalgamiertes Platinblech, welches von einer Paste aus Quecksilberoxydsulfat, Zinksulfat und Quecksilber umgeben und mit dieser in einer Tonzelle untergebracht ist. Zum Platinblech führt ein durch ein Glasrohr geschützter Platindraht. Der negative Pol besteht aus einem unten umgebogenen Zinkstabe, dessen vertikaler Teil durch ein Glasrohr, welches mit Paraffin ausgegossen ist, vor der Berührung mit dem Zinksulfate geschützt wird. Der horizontale Teil ist amalgamiert und von Zinksulfatkristallen überdeckt. Der übrige Raum wird durch konzentrierte Zinksulfatlösung ausgefüllt. Das Element ist durch Paraffin, Kork und Harzkitt luftdicht abgeschlossen und in dieser Form transportfähig. Da sich die EMK mit der Temperatur erheblich ändert, ist ein rechtwinklig gebogenes Thermometer angebracht, dessen Gefäß in der Nähe der Elektroden und dessen Teilung sich in einem im Ebonitdeckel des Elementes eingelassenen, horizontalen Rohrteile befindet. Bei der Temperatur t beträgt die EMK des Elementes

$$E_t = 1{,}4328 - 0{,}00119\,(t - 15^0) - 0{,}000007\,(t - 15^0)^2 \text{ Volt.}$$

Diese Formel gilt etwa zwischen 0—30° C. Die Änderung der EMK pro Grad beträgt innerhalb dieser Grenzen im Mittel 0,08 %. Schon nach sehr kurzer und geringer Stromentnahme (äußerer Widerstand von mehreren hunderttausend Ohm) dauert es einige Minuten, bis die EMK wieder den ursprünglichen Wert erreicht.

Bei dem von Weston angegebenen Normalelemente ist der Zinkstab und das Zinksulfat durch Kadmiumamalgam (1 Teil Kadmium auf zirka 7 Teile Quecksilber) und Kadmiumsulfat ersetzt. Es wird deshalb dieses Element auch häufig als Kadmiumelement bezeichnet. Für dasselbe eignet sich am besten die von Lord Rayleigh beim Clark-Elemente angewandte H-Form (Fig. 56). Die Kadmiumelemente der Phys.-techn. Reichsanstalt haben über dem Kadmiumamalgam noch eine Schicht von Kadmiumsulfatkristallen, während bei den Elementen der Weston Co. eine etwa bei 4° C gesättigte Lösung von Kadmiumsulfat ohne Kristalle verwendet wird. Die EMK der Elemente mit überschüssigen Kristallen ist bei der Temperatur t

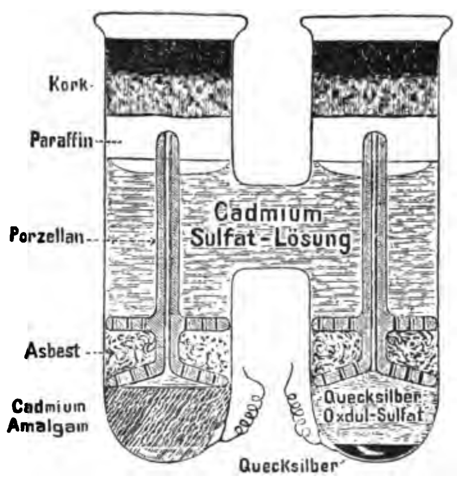


Fig. 56.

$$E_t = 1{,}0186 - 0{,}000038\,(t - 20^0) - 0{,}00000065\,(t - 20^0)^2 \text{ Volt.}$$

Die Änderung der EMK bei 1° Temperaturdifferenz beträgt also nur etwa 0,0035 %, welche so klein ist, daß sie innerhalb der normalen Temperaturschwankungen unberücksichtigt bleiben kann. Bei dem Kadmiumelemente der Weston Co. ist dieser Temperaturkoeffizient noch geringer, etwa 0,0005 %. Die EMK beträgt im Mittel 1,019 Volt. Außer dem Vorteile des verschwindend kleinen Temperaturkoeffizienten des Kadmiumelementes gegenüber dem Clark-Elemente ist noch zu erwähnen, daß ersteres nach vor-

heriger Stromentnahme stets den ursprünglichen Wert der EMK nach verhältnismäßig sehr kurzer Zeit wieder erreicht.

Was die Herstellungskosten der elektrischen Energie in galvanischen Elementen anbelangt, so sei auf die Berechnungen hingewiesen, welche Rühlmann in seinen „Grundzügen der Gleichstromtechnik" ausgeführt hat. Er berechnet dort u. a., daß in einem Daniell-Element die für eine Kilowattstunde erforderlichen Materialmengen betragen:

Material	Verbrauch pro KW-Stde	Preis pro kg	Materialpreis pro Kilowattstunde ca.
Zink	1,23 kg	0,6 Mk.	0,74 Mk.
Schwefelsäure	1,76 „	0,1 „	0,18 „
Kupfersulfat	4,62 „	0,5 „	2,31 „
			3,23 „
Dafür werden niedergeschlagen			
Kupfer	1,18 kg	0,7 Mk.	0,83 Mk.
Materialkosten (ohne Kosten für Bedienung und Amortisation der Gefäße, Klemmen usw.)			2,40 Mk. pro KW-Stde.

Da nun aber ein erheblicher Teil der entwickelten elektrischen Energie in der Batterie selbst verbraucht wird und sich stets wesentlich (1,3 bis 1,5 mal) mehr Zink auflöst, als dem chemischen Prozeß entsprechen würde [1]), so stellt sich der Preis der im äußeren Stromkreise verfügbaren Energie wesentlich höher.

Auch bei anderen Elementen stellt sich die Rechnung nicht erheblich günstiger, wie die nachstehende, auf heutige mittlere Preise der Materialien umgerechnete Zusammenstellung zeigt, die sich auf ein Güteverhältnis von ungefähr 60 % bezieht.

Die Kosten einer im äußeren Stromkreise verfügbaren Kilowattstunde betragen ungefähr beim

Daniell-Element	Mk. 3,55
Grove-Element	„ 2,30
Bunsen-Element (bei Gebrauch rauchender Salpetersäure)	„ 3,25
Chromsäure-Element	„ 4,60
Leclanché-Element	„ 5,70
Lalande- und Chaperon-Element	„ 8,10
Cupron-Element	„ 7,90.

Dagegen stellt sich der Preis einer Kilowattstunde bei Maschinenbetrieb [2]), und selbst bei Verwendung von Akkumulatoren so wesentlich billiger, daß jetzt nur noch unter besonderen Umständen größere Elektrizitätsmengen durch galvanische Elemente erzeugt werden.

7. Erzeugung von elektromotorischen Kräften durch Thermoelemente.

Bei den im vorstehenden Abschnitt besprochenen Elementen fand eine chemische Veränderung der angewendeten Stoffe, zumeist die Auflösung

[1]) Der Ausnutzungskoeffizient des Zinks, d. h. der Bruchteil der verbrauchten Zinkmenge, die wirklich zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet wird, beträgt z. B. beim Daniellelement und seinen Verwandten ungefähr 0,80, beim Chromsäure-Tauchelement 0,5, beim Bunsenschen Elemente mit Salpetersäure 0,78 bei sechsstündigem Gebrauche, beim Cupronelement 0,8.

[2]) 0,10 bis 0,50 Mk. pro Kilowattstunde.

eines Metalls statt. Es kann aber auch eine Veränderung des Wärmegrades eine elektromotorische Kraft erzeugen.

Erwärmt man irgendeinen Metalldraht an einzelnen Stellen, während man andere vor Erwärmung schützt oder abkühlt, so erhält man eine elektromotorische Kraft, welche bedeutend erhöht werden kann, wenn man durch Hämmern, Verdrehen, oftmaliges Biegen oder dgl. einen Teil des Drahtes härter macht, sein molekulares Gefüge künstlich verändert. Nimmt man endlich zwei verschiedene Metalle, lötet sie aneinander und erhitzt die Lötstelle beider, so erhält man eine noch stärkere elektromotorische Kraft. Eine solche Kombination, welche aus zwei verschiedenen, aneinandergelöteten Metallen besteht, ist ein Thermoelement.

Die Größe der elektromotorischen Kraft in einer solchen thermoelektrischen Kombination hängt ab von der Art der beiden Metalle M_1 und M_2, welche in Verbindung gebracht sind, und von dem Temperaturunterschied T_1 und T_2 (Fig. 57). Je größer der Unterschied der Temperatur, desto größer ist die elektromotorische Kraft, deren Richtung von der Natur der beiden Metalle abhängt. Man kann alle Metalle so in eine Reihe

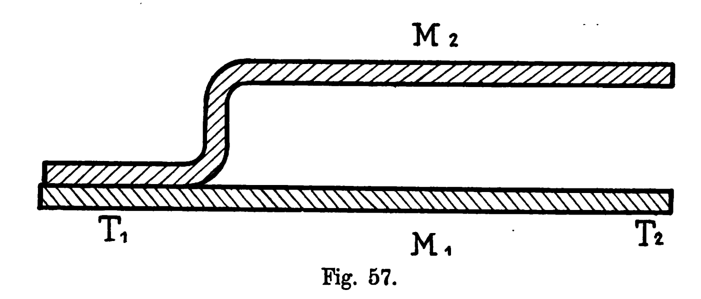


Fig. 57.

ordnen, daß immer der positive Strom durch die erwärmte Lötstelle vom vorhergehenden zum folgenden Metall geht. Man erhält dann die nachstehende thermoelektrische Spannungsreihe:

Wismut, Quecksilber, Platin, Gold, Kupfer, Zinn, Blei, Zink, Silber, Eisen, Antimon [1]).

Die elektromotorischen Kräfte von Thermoelementen haben nur dann eine bestimmte unveränderliche Größe, wenn man die Lötstellen des Elementes auf konstanter, gleichbleibender Temperatur erhält. Zu diesem Zwecke bringt man z. B. die eine Lötstelle in schmelzendes Eis, wo sie die

[1]) Die hier besprochenen thermoelektrischen Erscheinungen sind auch umkehrbar. Wenn man einen elektrischen Strom durch eine Lötstelle zwischen zwei verschiedenen Metallen hindurchsendet, so zeigt sich an der Lötstelle außer der Jouleschen Wärme (s. Abschnitt 14) noch eine besondere Erwärmung oder aber eine Abkühlung, je nach der Richtung, in welcher der Strom durch die Lötstelle fließt. Die thermoelektrische Reihe gilt auch für diese Erscheinung, sie gibt zugleich an, in welcher Richtung der Strom durch die Kombination zweier von den genannten Metallen fließen muß, damit die Lötstelle abgekühlt wird. Am kräftigsten zeigt sich diese Wirkung, wenn man den Strom durch einen Stab (Fig. 58) gehen läßt, welcher aus einem Wismutstab und einem Antimonstab zusammengesetzt ist. (Diese Kombination ergibt auch das kräftigste Thermoelement.) Wenn der Strom vom Wismut zum Antimon geht, wird die Lötstelle kälter, läßt man umgekehrt den Strom vom Antimon durch die Lötstelle zum Wismut gehen, so wird die Lötstelle wärmer, als sie nach dem Jouleschen Gesetz werden sollte. Man nennt diese Wirkung des Stromes nach ihrem Entdecker „Peltiereffekt“ und die positive oder negative Wärme die Peltiersche Wärme. Fig. 58 zeigt, daß bei gleicher Stromrichtung die Wirkung des Peltiereffektes die umgekehrte ist, wie die Ursache des Thermostromes.

Temperatur 0° bekommt, die andere in siedendes Wasser, wo sie die Temperatur 100° bekommt.

Die elektromotorischen Kräfte aller Thermoelemente sind nur kleine Bruchteile eines Volt. Je nach der Reinheit der Metalle ist die elektro-

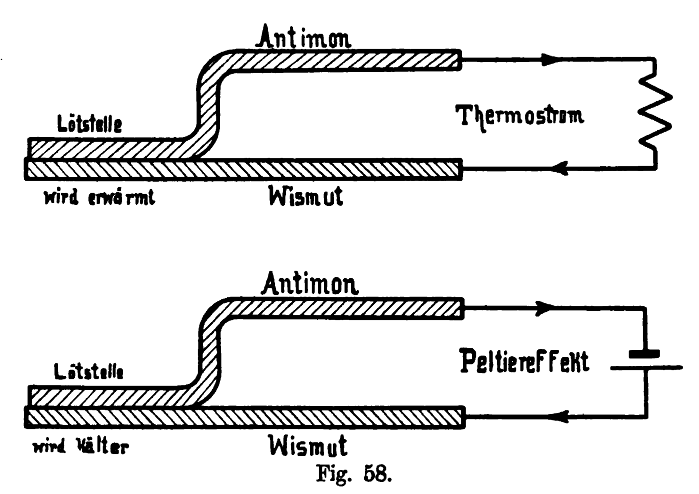


Fig. 58.

motorische Kraft oft sehr verschieden, sie hängt auch davon ab, ob die Metalle hartgezogen oder weich angewendet werden.

Im folgenden sind eine Anzahl von Metallen mit Quecksilber kombiniert und ihre elektromotorischen Kräfte angegeben, wenn die Temperaturdifferenz der Lötstellen 100° beträgt. Dabei zeigt das positive Verzeichen an, daß der erzeugte Thermostrom durch die warme Lötstelle vom Quecksilber zum anderen Metall geht, das negative Vorzeichen, daß er durch die warme Lötstelle vom anderen Metall zum Quecksilber geht.

Quecksilber	— Wismut	— 6,70	Millivolt		
„	— Nickel	— 1,66	„		
„	— Kobalt	— 1,53	„		
„	— Neusilber	— 1,08	„		
„	— Platin	+ 0,04	„	bis + 0,59	
„	— Aluminium	+ 0,36	„		
„	— Zinn	+ 0,39	„		
„	— Magnesium	+ 0,39	„		bei 100°
„	— Blei	+ 0,40	„		Temperatur-
„	— Messing	+ 0,44	„		differenz
„	— Kupfer (rein)	+ 0,72	„		
„	— Silber	+ 0,70	„		
„	— Gold	+ 0,71	„		
„	— Zink	+ 0,69	„	bis 0,73	
„	— Kohle	+ 0,66	„	„ 1,45	
„	— Kadmium	+ 0,87	„		
„	— Eisen	+ 1,60	„	„ 1,73	
„	— Antimon	+ 3,38	„		

Für die thermoelektrischen Kräfte gilt nun das Gesetz: Sind A und B zwei beliebige Metalle, und bezeichnet man die elektromotorischen Kräfte zwischen den zwei Metallen durch A | B, so ist

$$\text{Quecksilber} \mid A + A \mid B = \text{Quecksilber} \mid B.$$

Damit kann man aus den obigen Zahlen für irgend zwei Metalle die elektromotorische Kraft berechnen. Denn es ist

A | B = Quecksilber | B — Quecksilber | A[1]).

Viel stärkere thermoelektrische Kräfte erhält man, wenn man einige Halbmetalle, wie Tellur und Selen oder Schwefelmetalle untereinander oder mit Kupfer in thermoelektrische Berührung bringt. Nimmt man z. B. Kupferkies, lötet ihn mit Kupfer zusammen und bringt die eine Lötstelle auf 100°, die andere auf 0°, so hat dieses Thermoelement eine elektromotorische Kraft von 66,6 Millivolt, bei einer Temperaturdifferenz von 150° gar von 100 Millivolt. Ebenso hat z. B. das Thermoelement Kupferkies-Schwefelkies eine elektromotorische Kraft von 166,6 Millivolt. Zu wirksamen Thermoelementen sind diese Kombinationen aber kaum zu benutzen, weil Kupferkies und Schwefelkies eine sehr geringe Leitungsfähigkeit besitzen, so daß trotz der verhältnismäßig großen elektromotorischen Kraft die Stromstärke doch sehr klein wird.

Die elektromotorischen Kräfte von Thermoelementen ändern sich proportional dem Temperaturunterschied der Lötstellen, solange die Struktur der Metalle nicht selbst merklich geändert wird. Oft aber wird bei hohen Temperaturen die Struktur der Metalle geändert. Wenn die eine Lötstelle auf sehr hohe Temperatur gebracht wird, während die andere etwa Zimmertemperatur hat, so kann es vorkommen, daß die elektromotorische Kraft nicht nur nicht zunimmt, sondern abnimmt, so daß sie bei vielen Kombinationen bei gewissen Temperaturen ganz verschwindet. Bei noch höheren Temperaturen tritt dann zwar wieder eine elektromotorische Kraft auf, aber der Strom fließt dann durch das Thermoelement in umgekehrter Richtung.

Die Thermoelemente dienen einerseits dazu, um durch Temperaturänderung elektrische Ströme zu erzeugen, andererseits (und zwar meistens) werden sie dazu benutzt, um durch die elektrischen Ströme Temperaturänderungen anzuzeigen und zu messen.

Wie eben bemerkt, kann für kleinere Temperaturdifferenzen Proportionalität zwischen Stromstärke und Temperaturdifferenz angenommen werden. Man braucht also nur einmal die Stromstärke bei bekannter Temperaturdifferenz zu messen, um aus jeder Beobachtung die Temperatur abzuleiten. Zur Messung hoher Temperaturen (als Pyrometer) sind besonders Platin gegen Platin-Rhodium (10 % Rh, Le Chatelier) oder Platin-Iridium (10 % Ir, Barus) bis gegen den Schmelzpunkt des Platins brauchbar.

Thermokräfte treten vielfach bei elektrischen Präzisionsmessungen als störende Einflüsse auf. An Berührungsstellen verschiedener Metalle entstehen bei Messungen leicht infolge Berührung durch die Finger, infolge Strahlung durch den Körper oder durch die Heizungsanlage, infolge Reibung an Gleitkontakten usw., Erwärmungen, welche zu Thermokräften Veranlassung geben können, welche in die Meßresultate Fehler hineinbringen.

8. Schaltungen von elektromotorischen Kräften.

Jede Vorrichtung, in welcher durch eine der vorbesprochenen Vorgänge (Magnetinduktion, chemische Vorgänge, thermoelektrische Vorgänge) eine

[1]) Nimmt man z. B. als Metall A das Neusilber, als Metall B das Eisen, so ist

Quecksilber | Eisen — Quecksilber | Neusilber = Neusilber | Eisen
1,60 — (— 1,08) = + 2,68 Millivolt.

Das positive Zeichen zeigt an, daß der Strom durch die warme Lötstelle vom Neusilber zum Eisen geht. Die Kombination Wismut | Kupfer hat die elektromotorische Kraft 7,42 Millivolt, die Kombination Wismut | Antimon 10,08 Millivolt.

bestimmte elektromotorische Kraft e erzeugt worden ist, hat eine ganz bestimmte Leistungsfähigkeit i · e, da die maximale Stromstärke, welche durch die Vorrichtung geliefert werden kann, durch die inneren Widerstände, durch den Querschnitt, den der Strom in der Vorrichtung für seinen Durchgang findet, sowie durch andere Umstände eine mehr oder weniger fest bestimmte Größe i hat.

Will man nun eine größere Leistung erzielen, so muß man mehrere solche Vorrichtungen miteinander kombinieren. Dafür gibt es drei Möglichkeiten, und zwar

α) die Hintereinanderschaltung oder Serienschaltung,
β) die Nebeneinanderschaltung oder Parallelschaltung,
γ) die gemischte Schaltung, Gruppenschaltung oder Serienparallelschaltung.

a) Schaltung von Primär- und Sekundär-Elementen.

Hat man n Elemente[1]), von denen jedes eine elektromotorische Kraft e Volt hat und eine maximale Stromstärke von i Ampere zu liefern gestattet, so ist die Gesamtleistung der Elemente n · e · i Watt.

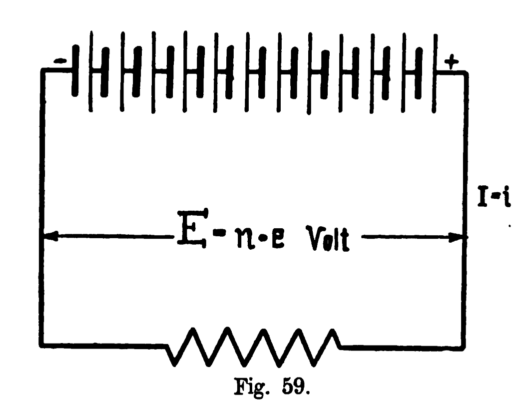


Fig. 59.

Schaltet man diese n Elemente so hintereinander, daß man immer den positiven Pol des einen mit dem negativen Pol des nächsten verbindet, so wie dies in Fig. 59 für n = 12 Elemente dargestellt ist (Serienschaltung), so ist die Spannung zwischen Anfang des ersten und Ende des letzten Elementes gleich E = n · e. Wird der äußere Stromkreis geschlossen, so fließt durch sämtliche n Elemente ein und derselbe Strom, welcher maximal i Ampere betragen darf. Die Leistung der Batterie bei dieser Hintereinanderschaltung ist also (n · e) · i Watt.

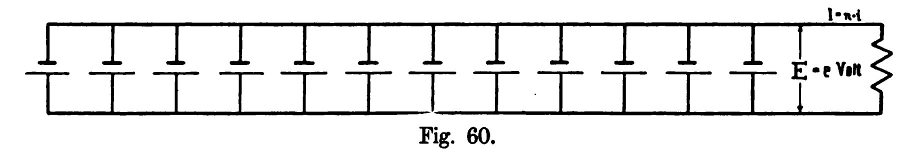


Fig. 60.

Schaltet man diese n Elemente so, daß man sämtliche positiven Pole und ebenso sämtliche negativen Pole miteinander verbindet, so wie dies in Fig. 60 für n = 12 Elemente dargestellt ist (Parallelschaltung), so ist die Spannung E der Batterie so groß wie diejenige eines einzelnen Elementes, also E = e. Wird der äußere Stromkreis geschlossen, so kann jetzt jedes der n Elemente eine Stromstärke von i Ampere liefern, so daß

---

[1]) Eine Kombination von mehreren einzelnen Elementen nennt man eine Batterie oder Säule. Bei den nachstehenden Betrachtungen ist angenommen, daß der äußere Widerstand, d. h. der Widerstand des Schließungskreises, sehr klein (fast Null) ist. Bei Besprechung des Ohmschen Gesetzes (Abschnitt 10) ist dann erörtert, wie sich die einzelnen Schaltungen bei verschiedenen äußeren Widerständen verhalten.

die Gesamtstromstärke im äußeren Stromkreise $(n \cdot i)$ Ampere betragen kann. Die Leistung der Batterie bei dieser Parallelschaltung ist also wiederum $(n \cdot i) \cdot e$ Watt.

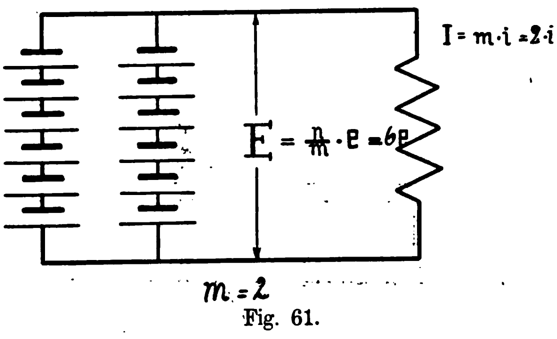


Fig. 61.

Man kann nun diese n Elemente auch in m Gruppen von je $\frac{n}{m}$ in Serie geschalteten Elementen teilen und diese m Gruppen parallel schalten.

Die Spannung an den Polen der Batterie beträgt dann $\frac{n}{m} \cdot e$ Volt, während jede der m Gruppen eine Stromstärke i Ampere, die gesamte Batterie also mi Ampere, zu liefern vermag. Die Leistung der Batterie bei dieser Serienparallelschaltung ist $E = \left(\frac{n}{m} e\right) \cdot m \cdot i$, also wiederum $n \cdot e \cdot i$ Watt. m muß so gewählt werden, daß $\frac{n}{m}$ eine ganze Zahl gibt. Ist n eine Primzahl, so ist Serienparallelschaltung ausgeschlossen.

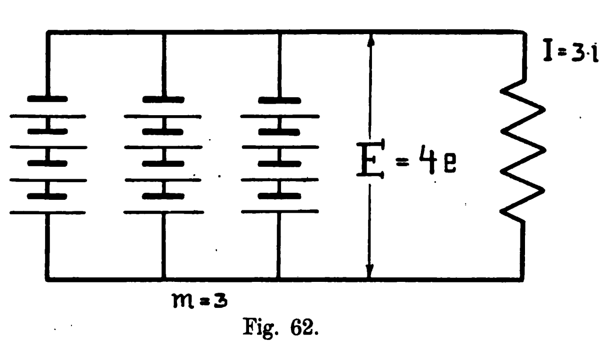


Fig. 62.

n =	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	n = 12 (Fig. 61—64)
m =	—	—	2	—	2	—	2	3	2	—	m = 2 (Fig. 61)
	—	—	—	—	3	—	4	—	5	—	m = 3 („ 62)
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	m = 4 („ 63)
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	m = 6 („ 64)

Fig. 63.

Bei der Hintereinanderschaltung ist also die Spannung vergrößert (die Elemente sind „auf Spannung geschaltet“), bei der Parallelschaltung ist

die Stromstärke vergrößert (die Elemente sind „auf Intensität geschaltet"); durch Serienparallelschaltung kann man entsprechende Zwischenstufen erreichen.

Fig. 61—64 zeigen für $n = 12$ die vier möglichen Kombinationen der Serienparallelschaltung.

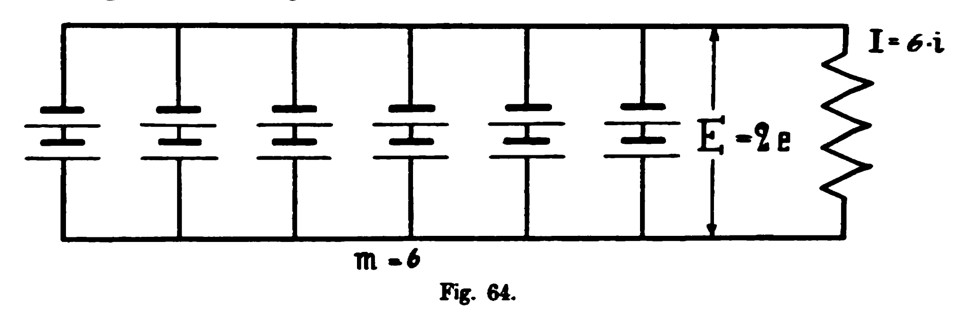


Fig. 64.

Eine besondere Art der Hintereinanderschaltung zweier Elemente ist die Gegenschaltung (Fig. 65). Wenn man nämlich den positiven Pol des ersten Elementes nicht mit dem negativen Pol, sondern mit dem positiven Pol des zweiten Elementes verbindet, so wird an den Enden der Batterie nicht die Spannung $e_1 + e_2$, sondern die Spannung $e_1 + (-e_2) = e_1 - e_2$ herrschen, weil die Richtung der EMK im zweiten Element der im ersten entgegengesetzt gerichtet ist.

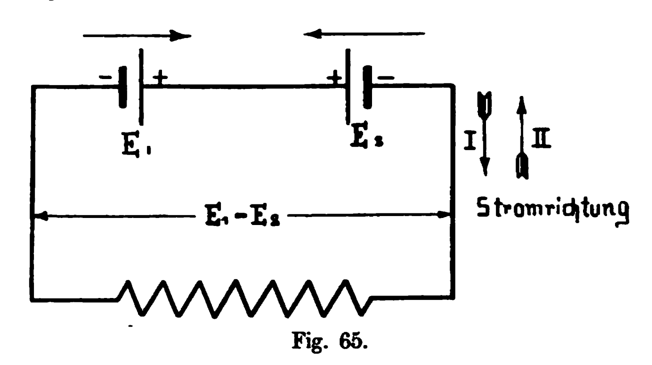


Fig. 65.

Die Richtung von e_1 ist als positiv angenommen, ist $e_1 > e_2$, so ist $e_1 - e_2$ positiv, d. h. die Richtung des Stromes im äußeren Stromkreis entspricht der Richtung der EMK e_1 (I). Ist dagegen $e_1 < e_2$, so ist $e_1 - e_2$ negativ, d. h. die Richtung des Stromes im äußeren Stromkreis ist der Richtung der EMK e_1 entgegengesetzt gerichtet (II).

b) Elektromotorische Kraft einer dynamoelektrischen Maschine.

Auf Seite 41 wurde die Größe der elektromotorischen Kraft abgeleitet, welche in einem Ankerdrahte erzeugt wird, wenn die Maschine p Polpaare besitzt, n Umdrehungen pro Minute macht und die Kraftlinienzahl eines Polpaares Z beträgt. Es war die EMK

$$e_m = \frac{2p \cdot Z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Auf einem Dynamoanker befinden sich nun nicht nur ein Draht, sondern z Drähte (wirksame Ankerleiter). Fig. 66 zeigt schematisch einen Anker mit $z = 16$ Drähten.

Bei einer Gleichstrommaschine unterscheidet man wieder Parallelschaltung, Serienschaltung und Serienparallelschaltung der Ankerdrähte. Man kann sich die Schaltungen am besten vorstellen, wenn man sich die z Ankerdrähte in so viele Abteilungen geteilt denkt, als Pole vorhanden sind. Jede Maschine besitzt also 2 p Ankerabteilungen, jede Ankerabteilung $\frac{z}{2p}$ Drähte.

Bei der Parallelschaltung werden sämtliche Ankerabteilungen durch die Bürsten parallelgeschaltet. Jede Gruppe enthält also $\frac{z}{2p}$ hintereinandergeschaltete Drähte.

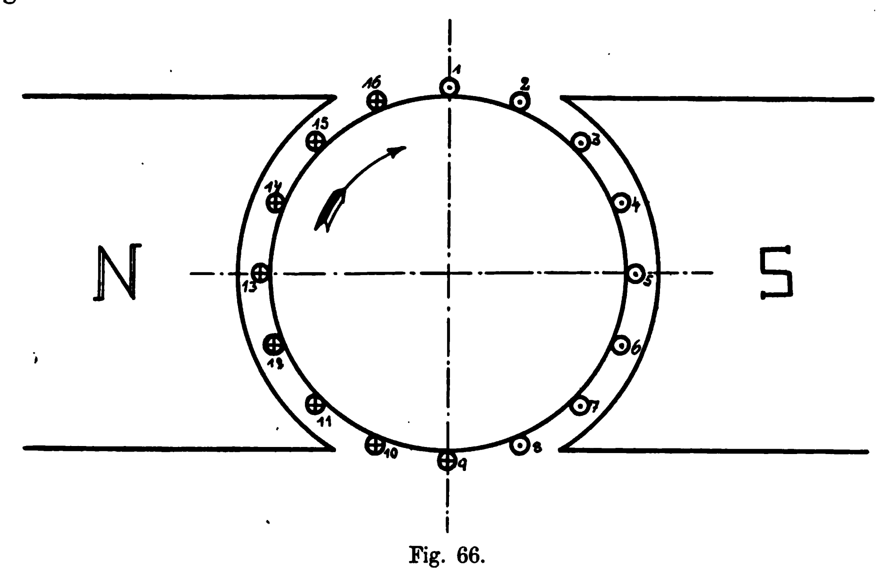


Fig. 66.

Die EMK ist infolgedessen

$$E = \frac{z}{2p} \cdot e_m = \frac{z}{2p} \cdot \frac{2p \cdot Z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} = \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Bei der Serienschaltung werden die Ankerabteilungen in 2 Gruppen geteilt und diese beiden Gruppen durch die Bürsten parallelgeschaltet. Jede Gruppe enthält also $\frac{z}{2}$ hintereinandergeschaltete Drähte.

Die EMK ist infolgedessen

$$E = \frac{z}{2} \cdot e_m = \frac{z}{2} \cdot \frac{2p \cdot Z \cdot n}{60} 10^{-8} = p \cdot \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Bei der Serienparallelschaltung werden die Ankerabteilungen in p' gleiche Gruppen[1]) geteilt und diese p' Gruppen durch die Bürsten parallelgeschaltet. Jede Gruppe enthält also $\frac{z}{p'}$ hintereinandergeschaltete Drähte.

---

[1]) p' muß immer eine gerade Zahl sein.

die Stromstärke vergrößert (die Elemente sind „auf Intensität geschaltet“); durch Serienparallelschaltung kann man entsprechende Zwischenstufen erreichen.

Fig. 61—64 zeigen für $n = 12$ die vier möglichen Kombinationen der Serienparallelschaltung.

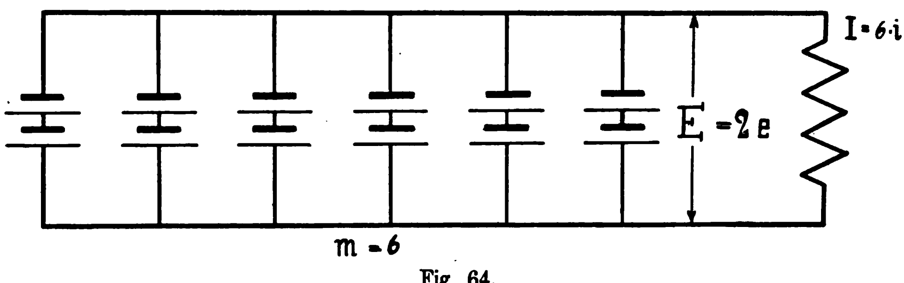


Fig. 64.

Eine besondere Art der Hintereinanderschaltung zweier Elemente ist die Gegenschaltung (Fig. 65). Wenn man nämlich den positiven Pol des ersten Elementes nicht mit dem negativen Pol, sondern mit dem positiven Pol des zweiten Elementes verbindet, so wird an den Enden der Batterie nicht die Spannung $e_1 + e_2$, sondern die Spannung $e_1 + (-e_2) = e_1 - e_2$ herrschen, weil die Richtung der EMK im zweiten Element der im ersten entgegengesetzt gerichtet ist.

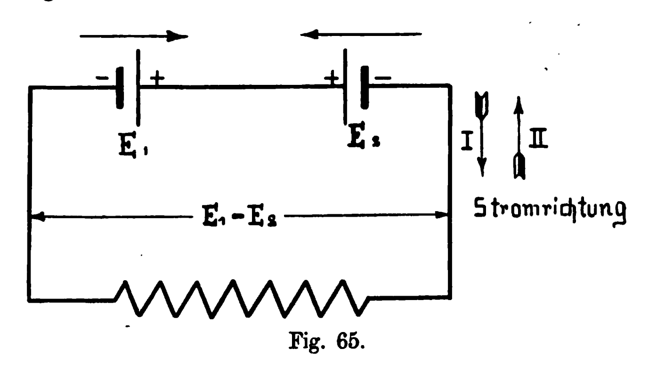


Fig. 65.

Die Richtung von e_1 ist als positiv angenommen, ist $e_1 > e_2$, so ist $e_1 - e_2$ positiv, d. h. die Richtung des Stromes im äußeren Stromkreis entspricht der Richtung der EMK e_1 (I). Ist dagegen $e_1 < e_2$, so ist $e_1 - e_2$ negativ, d. h. die Richtung des Stromes im äußeren Stromkreis ist der Richtung der EMK e_1 entgegengesetzt gerichtet (II).

b) Elektromotorische Kraft einer dynamoelektrischen Maschine.

Auf Seite 41 wurde die Größe der elektromotorischen Kraft abgeleitet, welche in einem Ankerdrahte erzeugt wird, wenn die Maschine p Polpaare besitzt, n Umdrehungen pro Minute macht und die Kraftlinienzahl eines Polpaares Z beträgt. Es war die EMK

$$e_m = \frac{2p \cdot Z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Auf einem Dynamoanker befinden sich nun nicht nur ein Draht, sondern z Drähte (wirksame Ankerleiter). Fig. 66 zeigt schematisch einen Anker mit $z = 16$ Drähten.

Bei einer Gleichstrommaschine unterscheidet man wieder Parallelschaltung, Serienschaltung und Serienparallelschaltung der Ankerdrähte. Man kann sich die Schaltungen am besten vorstellen, wenn man sich die z Ankerdrähte in so viele Abteilungen geteilt denkt, als Pole vorhanden sind. Jede Maschine besitzt also 2 p Ankerabteilungen, jede Ankerabteilung $\frac{z}{2p}$ Drähte.

Bei der Parallelschaltung werden sämtliche Ankerabteilungen durch die Bürsten parallelgeschaltet. Jede Gruppe enthält also $\frac{z}{2p}$ hintereinandergeschaltete Drähte.

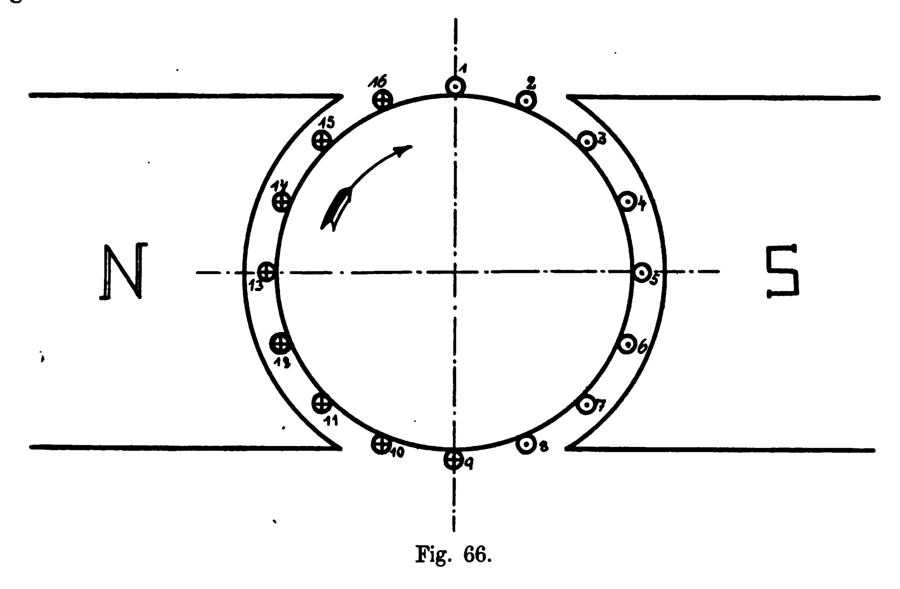


Fig. 66.

Die EMK ist infolgedessen

$$E = \frac{z}{2p} \cdot e_m = \frac{z}{2p} \cdot \frac{2p \cdot Z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} = \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Bei der Serienschaltung werden die Ankerabteilungen in 2 Gruppen geteilt und diese beiden Gruppen durch die Bürsten parallelgeschaltet. Jede Gruppe enthält also $\frac{z}{2}$ hintereinandergeschaltete Drähte.

Die EMK ist infolgedessen

$$E = \frac{z}{2} \cdot e_m = \frac{z}{2} \cdot \frac{2p \cdot Z \cdot n}{60} 10^{-8} = p \cdot \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Bei der Serienparallelschaltung werden die Ankerabteilungen in p′ gleiche Gruppen[1]) geteilt und diese p′ Gruppen durch die Bürsten parallelgeschaltet. Jede Gruppe enthält also $\frac{z}{p'}$ hintereinandergeschaltete Drähte.

---

[1]) p′ muß immer eine gerade Zahl sein.

Die EMK ist infolgedessen

$$E = \frac{z}{p'} \cdot e_m = \frac{z}{p'} \cdot \frac{2\,p \cdot Z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} = \frac{2\,p}{p'} \cdot \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Diese letzte Formel

$$E = \frac{2\,p}{p'} \cdot \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

ist zugleich die allgemeine Formel für die elektromotorische Kraft einer Gleichstrommaschine, wenn man mit p' allgemein die Zahl der parallelgeschalteten Ankerzweige bezeichnet[1]).

Nimmt man eine bestimmte Stärke des Ankerdrahtes an, so kann jeder Draht eine bestimmte Anzahl, z. B. i Ampere, fortleiten. Folglich kann

eine Maschine mit Parallelschaltung $I = 2\,p \cdot i$ Ampere
„ „ „ Serienschaltung $I = 2 \cdot i$ „
„ „ „ Serienparallelschaltung $I = p'\,i$ „ liefern,

oder allgemein kann eine Gleichstrommaschine $p' \cdot i$ Ampere liefern, wenn p' wieder allgemein die Zahl der parallelgeschalteten Ankerzweige bedeutet.

Die Leistung der Maschine ist also für alle drei Schaltungen gleich groß, und zwar

$$L = I \cdot E = p' \cdot i \cdot \frac{2\,p}{p'} \cdot \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} = i \cdot \frac{2\,p \cdot Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Watt.}$$

Darin bedeutet also i diejenige Stromstärke (in Ampere), für welche der Ankerdraht berechnet ist.

Bei einer Wechselstrommaschine kann man die sämtlichen z Drähte hintereinanderschalten. Die gesamte elektromotorische Kraft der Maschine wird dann z mal so groß als die elektromotorische Kraft eines Drahtes, also

$$E = \frac{2\,p \cdot Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

In Wirklichkeit entspricht die EMK einer Wechselstrommaschine nicht ganz dieser Formel, was mit der Spulenform, der Polbreite und anderen Umständen zusammenhängt. Man muß die obige Formel noch mit einem Faktor $\frac{k}{2}$ multiplizieren und schreibt die Formel

$$E = k \cdot \frac{Z \cdot z \cdot p \cdot n}{60} \cdot 10^{-8}.$$

k ist eine Zahl zwischen 1,2 und 3,5, meist jedoch größer als 2. Vergleicht man diese Formel mit der auf Seite 55 für die Gleichstrommaschine mit Serienschaltung gefundene Formel $E = \frac{p \cdot Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8}$, so erkennt man, daß k den Faktor bedeutet, der angibt, wieviel mal die EMK der Wechselstrommaschine größer ist als die einer Gleichstrommaschine mit Serienschaltung bei demselben p, Z, z und n. Die Stromstärke der Gleichstrommaschine kann aber bei gleicher Drahtstärke 2 mal so groß sein als

[1]) Bei der Parallelschaltung ist $p' = 2\,p$, folglich

$$E = \frac{2\,p}{2\,p} \cdot \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} = \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8}.$$

Bei der Serienschaltung ist $p' = 2$, folglich

$$E = \frac{2\,p}{2} \cdot \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8} = p \cdot \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8}.$$

bei der Wechselstrommaschine, da die Drähte bei letzterer sämtliche hintereinandergeschaltet sind, bei ersterer dagegen zu zwei Hälften parallel. Die Leistungen beider Maschinen werden also nicht wesentlich voneinander abweichen. (Näheres siehe Heft 2.)

9. Widerstand und Leitfähigkeit.

Der Widerstand, welchen ein Material dem Durchgange des Stromes entgegensetzt, ist von vier Faktoren abhängig: 1. von der Länge, 2. von dem Querschnitt, 3. von dem Material, 4. von der Temperatur.

Es ist ohne weiteres klar, daß der Widerstand um so größer sein muß, je länger der Stromweg ist, und um so kleiner, je kürzer er ist, daß also der Widerstand direkt proportional der Länge l des Leiters ist.

Ebenso einleuchtend ist es wohl, daß der Widerstand um so größer sein muß, je kleiner der Querschnitt des Stromweges, ist und um so kleiner, je größer er ist, daß also der Widerstand umgekehrt proportional dem Querschnitt q des Leiters ist.

Der Einfluß des Materials auf den Widerstand wird durch eine Materialkonstante s ausgedrückt.

Was den Einfluß der Temperatur anbelangt, so beträgt die Zu- oder Abnahme des Widerstandes bei jedem Grad Temperaturänderung einen ganz bestimmten Teil α des ganzen Widerstandes, bei t Grad Temperaturänderung also $\alpha \cdot t$ Teile des ganzen Widerstandes.

a) Spezifischer Widerstand, Leitfähigkeit und Temperaturkoeffizient.

Man kann die Gleichung des Widerstandes W_0 bei der Temperatur $t_1 = 0^0$ schreiben

$$W_0 = s_0 \frac{l}{q},$$

worin s_0 die Materialkonstante bei 0^0 C bedeutet.

Setzt man in diese Gleichung l in Metern und q in Quadratmillimetern ein, so ergibt sich W_0 direkt in Ohm.

Aus der Gleichung $W_0 = s_0 \frac{l}{q}$ folgt aber sofort die Bedeutung der Materialkonstanten s_0. Setzt man nämlich $l = 1$ und $q = 1$, so wird $s_0 = W_0$, d. h. s_0 ist der Widerstand, ausgedrückt in Ohm, von einem Leiter von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt. Diesen Wert s_0 nennt man den spezifischen Widerstand des betreffenden Materiales bei 0^0 C.

Der Widerstand W_t bei der Temperatur $t_2 = t^0$ C ist nun nach dem oben Gesagten

$$W_t = W_0 + \alpha \cdot (t_2 - t_1) \cdot W_0,$$

worin $t_2 - t_1$ die Temperaturänderung bedeutet, im vorliegenden Falle mit $t_1 = 0$, $t_2 = t$ ist $t_2 - t_1 = t$, so daß man die Gleichung schreiben kann

$$W_t = W_0 + \alpha \cdot t \cdot W_0 = W_0 (1 + \alpha t).$$

Da $W_0 = s_0 \frac{l}{q}$, so ist

$$W_t = s_0 \frac{l}{q} (1 + \alpha t) = s_0 (1 + \alpha t) \cdot \frac{l}{q} = s_t \frac{l}{q},$$

worin $s_t = s_0 (1 + \alpha t)$ den spezifischen Widerstand bei t^0 C bedeutet.

α heißt der Temperaturkoeffizient und bedeutet, wie aus obigem hervorgeht, die Widerstandsänderung pro Grad Temperaturänderung in Teilen des Ganzen (100 α bedeutet die Widerstandsänderung pro Grad Temperaturänderung ausgedrückt in %).

Bei Metallen nimmt mit zunehmender Temperatur der Widerstand zu (α positiv), bei Kohle dagegen ab (α negativ).

Den reziproken Wert des Widerstandes nennt man die Leitfähigkeit, den reziproken Wert des spezifischen Widerstandes nennt man die spezifische Leitfähigkeit, also

$$\text{Leitfähigkeit eines Leiters von W}\,\Omega\text{ Widerstand} = \frac{1}{W}$$

$$\text{Spezifische Leitfähigkeit eines Materiales von s}\,\Omega\text{ spez. Widerstand} = \frac{1}{s}.$$

Die Leitfähigkeit ist also umgekehrt proportional dem Widerstand, d. h. je kleiner der Widerstand, desto größer ist die Leitfähigkeit, und umgekehrt, die Leitfähigkeit ist demnach direkt proportional dem Querschnitt und umgekehrt proportional der Länge des Leiters.

Da 1 Ohm definiert ist als der Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt, so ist für Quecksilber $s \cdot \frac{1{,}063}{1} = 1$ und $s = \frac{1}{1{,}063} = 0{,}94073$ und $\frac{1}{s} = 1{,}063$, d. h. also, der spezifische Widerstand und die spezifische Leitfähigkeit des Quecksilbers ist nicht gleich 1, wie vielfach angenommen wird.

Häufig[1]) berechnet man den spezifischen Widerstand nicht für $l = 1$ m und $q = 1$ qmm, sondern für $l = 1$ cm und $q = 1$ qcm, also für einen Zentimeterwürfel; die so gewonnenen Zahlen für den spezifischen Widerstand bezeichnet man mit Widerstandskoeffizient. Nennt man diesen Koeffizienten ρ, so ist ρ 10000 mal so klein als der auf 1 m und 1 qmm bezogene spezifische Widerstand s.

Da bei Metallen ρ, in Ohm ausgedrückt, zu klein werden würde, gibt man ρ in Mikrohm (d. h. in millionstel Ohm) an, bei Flüssigkeiten wird ρ in Ohm, bei Isolatoren in Megohm (d. h. in Millionen Ohm) ausgedrückt. Um also den Widerstandskoeffizienten in Mikrohm zu erhalten, muß man den spezifischen Widerstand s durch 10000 teilen und mit 1000000 multiplizieren, also

$$\rho \text{ in Mikrohm} = \frac{1000000}{10000} \cdot s = s \cdot 10^2,$$

$$\rho \text{ in Ohm} = \frac{s}{10000} = s \cdot 10^{-4},$$

$$\rho \text{ in Megohm} = \frac{s}{10000 \cdot 1000000} = s \cdot 10^{-10}.$$

Die Flüssigkeiten, welche den elektrischen Strom leiten, sind mit Ausnahme von Quecksilber Leiter zweiter Klasse, und der Widerstand, den sie dem Durchgange eines Stromes entgegensetzen, ist immer viel größer als der der Metalle. Die spezifische Leitfähigkeit von Salz- oder Säurelösungen ist abhängig von ihrer Konzentration und von der Temperatur.

Trotzdem die Flüssigkeiten den Strom sehr viel schlechter leiten als die Metalle, sind sie doch noch sehr gute Leiter gegenüber den eigentlichen Isolatoren.

[1]) Besonders bei Flüssigkeiten und Isolatoren.

Die nachstehende Tabelle enthält einige Angaben[1]) über die spezifischen Widerstände bzw. Leitfähigkeiten, sowie den Temperaturkoeffizienten α einiger Materialien.

Metalle und Kohle	s Ohm bei 0_0 C	α	ρ Mikrohm eines Zentimeterwürfels bei 0° C	Leitfähigkeit bei 0° C $\frac{1}{s}$
Aluminium	0,0270	+ 0,0039	2,7	37
Blei	0,1958	+ 0,0041	19,58	5,1
Eisen	0,0973	+ 0,0045	9,725	10,3
Gold	0,0206	+ 0,0038	2,06	48
Kupfer (rein)	0,0153	+ 0,0038	1,533	65
Kupfer (käuflich)	0,0165	+ 0,0040	1,652	60
Nickel	0,1240	+ 0,0037	12,40	8,1
Platin	0,0903	+ 0,0035	9,03	11
Quecksilber	0,9407	+ 0,00091	94,073	1,063
Silber (weich)	0,0150	+ 0,0038	1,499	67
Silber (hart)	0,0163	+ 0,0038	6,626	60
Wismut	0,3125	+ 0,0037	31,25	3,2
Zink	0,0561	+ 0,00365	5,61	17,8
Zinn	0,1318	+ 0,0042	13,18	7,7
Gaskohle	62,0000	— 0,0003 bis — 0,0008	6200	0,016
Konstantan	0,5000	— 0,00003	50	2
Neusilber	0,3000	+ 0,0008 bis + 0,0004	30	3,3
Nickelin	0,43 bis 0,51	+ 0,00007 bis + 0,00019	43 bis 51	2,3 bis 1,9
Patentnickel	0,342	+ 0,00017	34,2	3,0
Manganin	0,47	± 0,00002	47	2,1

Flüssigkeiten	ρ Ohm bei 18° C	$\frac{1}{\rho}$ bei 18° C	α
Schwefelsäure 30,4 %	1,35	0,7398	— 0,025
Bittersalzlösung 17,3 %	20,3	0,0492	
Zinkvitriollösung 23,7 %	20,9	0,0480	
Kochsalzlösung konzentr.	4,63	0,2160	
Essigsäure 16,6 %	625,0	0,0016	

Isolatoren	ρ Megohm eines Zentimeterwürfels
Zelluloid	75 000
Glas	8 000 000
Glimmer	2 300 000
Hartgummi	4 200 000 000
Paraffin	3 000 000 000
Stabilit	24 000 000
Vulkanfiber	53
Olivenöl	1 000 000
Benzol	1 300

b) Verschiedene Schaltungsweisen der Widerstände im Stromkreis.

Widerstände kann man im Stromkreise entweder hintereinander (in Serien) schalten oder nebeneinander (parallel) schalten. Hat man also z. B. einen Widerstand W_1 im Stromkreis (Fig. 67), so kann man einen zweiten Widerstand W_2 entweder nach Fig. 68 in Serie zu W_1, oder nach Fig. 69 parallel zu W_1 schalten.

Der zwischen den Punkten A und B eingeschaltete Widerstand ist durch das Hinzukommen des Widerstandes W_2 natürlich verändert, und zwar:

bei der Serienschaltung (Fig. 68) offenbar vergrößert worden, denn

[1]) Die hier gegebenen Zahlen sind Mittelwerte aus den mehr oder weniger abweichenden Angaben verschiedener Werke. Der spezifische Widerstand hängt so sehr von der Reinheit des Materiales und der Struktur ab, daß es nicht möglich ist, eine ganz bestimmte Zahl anzugeben. Harte Drähte, gehämmerte Metalle, gegossene Stücke haben zumeist größeren Widerstand als weiche Metalle.

er setzt jetzt dem von A nach B fließenden Strom einen größeren Widerstand und zwar $W_1 + W_2$ entgegen;

bei der Parallelschaltung (Fig. 69) offenbar verkleinert worden, denn der Strom hat jetzt auf seinem Wege von A nach B nicht nur den einen Weg über W_1, sondern noch einen zweiten über W_2, so daß jetzt der Strom zwischen den Punkten A und B einen kleineren Widerstand findet, als vorher, als nur W_1 einzuschalten war.

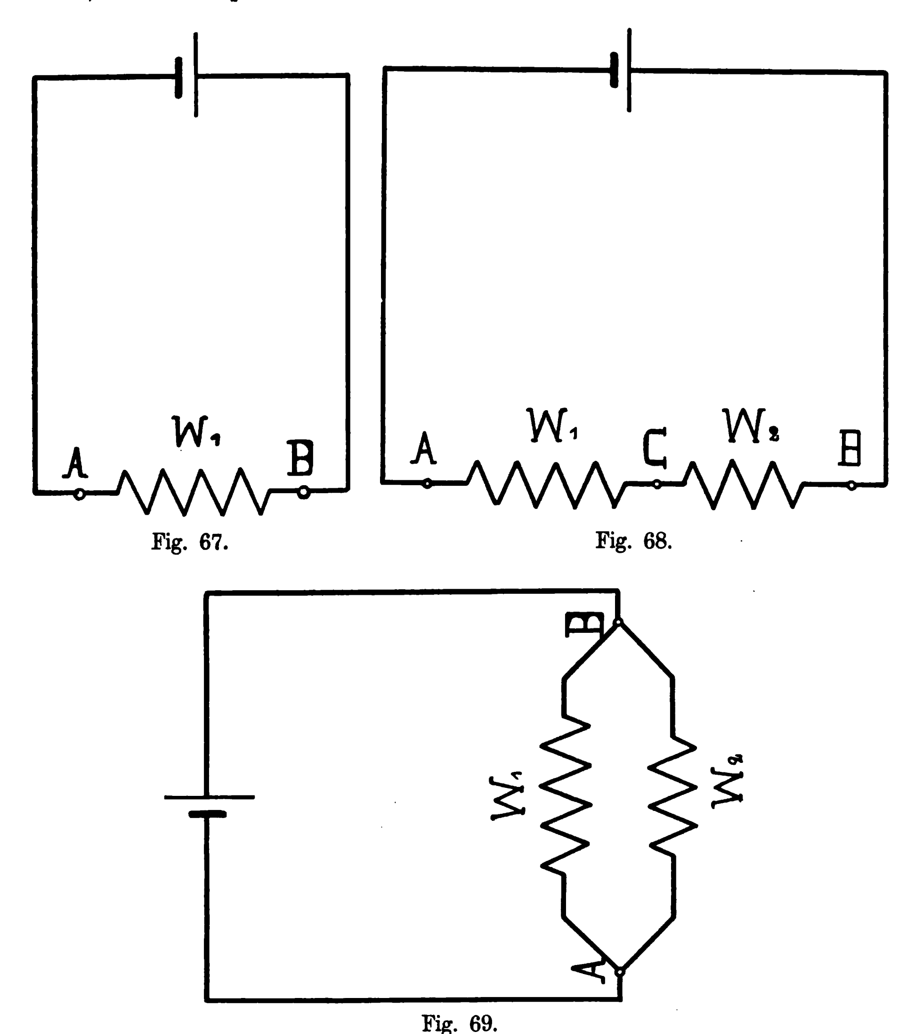


Fig. 67. Fig. 68.

Fig. 69.

Man nennt einen aus mehreren einzelnen Widerständen bestehenden Widerstand einen Kombinationswiderstand.

Für die Berechnung der Größe des Kombinationswiderstandes gelten folgende beiden Sätze:

1. Bei Serienschaltung ist der Kombinationswiderstand W gleich der Summe der einzelnen Widerstände:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + \ldots W_n.$$

2. Bei Parallelschaltung ist die Leitfähigkeit der Kombination gleich der Summe der Leitfähigkeiten der einzelnen Widerstände:

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} + \frac{1}{W_3} + \frac{1}{W_4} + \dots \frac{1}{W_n}\ ^{1)}.$$

Ist $W_1 = W_2 = W_3 = W_4 = \dots W_n$, d. h. schaltet man n gleiche Widerstände parallel, so berechnet sich der Widerstand W der Kombination aus $\frac{1}{W} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_1} + \dots \frac{1}{W_1} = n \frac{1}{W_1}$ zu

$$W = \frac{W_1}{n}.$$

Zerlegt man einen Leiter vom Widerstand W in n gleiche Teile (von denen dann also jeder einen Widerstand $\frac{W}{n}$ hat) und schaltet diese n gleichen Teile sämtliche parallel, so berechnet sich der Widerstand X der Kombination

aus $\frac{1}{X} = n \cdot \frac{1}{\frac{W}{n}} = \frac{n^2}{W}$ zu $X = \frac{W}{n^2}$ [2]).

10. Das Ohmsche Gesetz.

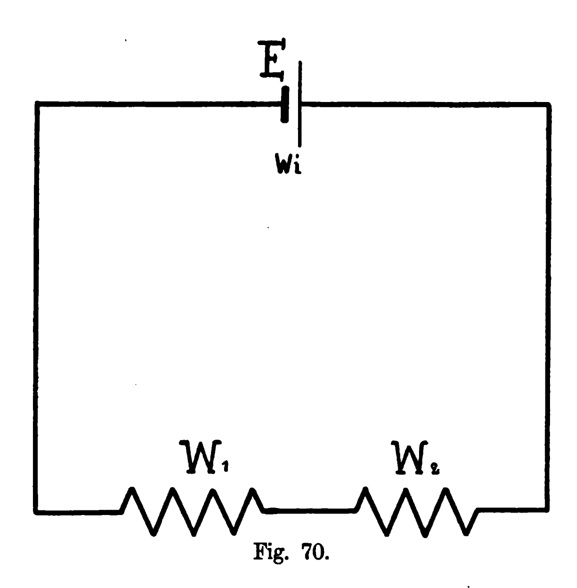


Fig. 70.

a) Das Ohmsche Gesetz für den gesamten Stromkreis.

Das Ohmsche Gesetz, das Grundgesetz für die gesamte Gleichstromtechnik, lautet:

Die Stromstärke ist gleich der algebraischen Summe aller im Stromkreis hintereinandergeschalteten elektromotorischen Kräfte, dividiert durch die Summe aller im Stromkreis hintereinandergeschalteten Widerstände.

---

[1]) Bei zwei parallelen Widerständen ist

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} = \frac{W_2 + W_2}{W_1 \cdot W_2}, \text{ mithin } W = \frac{W_1 \cdot W_2}{W_1 + W_2}.$$

Bei drei parallelen Widerständen ist

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} + \frac{1}{W_3} = \frac{W_2 W_3 + W_1 \cdot W_3 + W_1 \cdot W_2}{W_1 \cdot W_2 \cdot W_3}$$

$$W = \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot W_3}{W_2 W_3 + W_1 W_3 + W_1 W_2}.$$

[2]) Bei einem Gleichstromanker wird der auf den Anker gewickelte Draht mit dem Gesamtwiderstand W in p′ gleiche Teile geteilt und diese p′ gleichen Teile dann parallelgeschaltet (s. Seite 55). Der Ankerwiderstand a ist demnach $a = \frac{W}{(p')^2}$.

$$I = \frac{\text{Algebraische Summe aller E}}{\text{Summe aller in Serie geschalteten W}}.$$

Fall 1 (Fig. 70): $$I = \frac{E}{w_i + W_1 + W_2}.$$

Fall 2 (Fig. 71): $$I = \frac{E}{w_i + \frac{W_1 \cdot W_2}{W_1 + W_2}}.$$

Fig. 71.

Fig. 72.

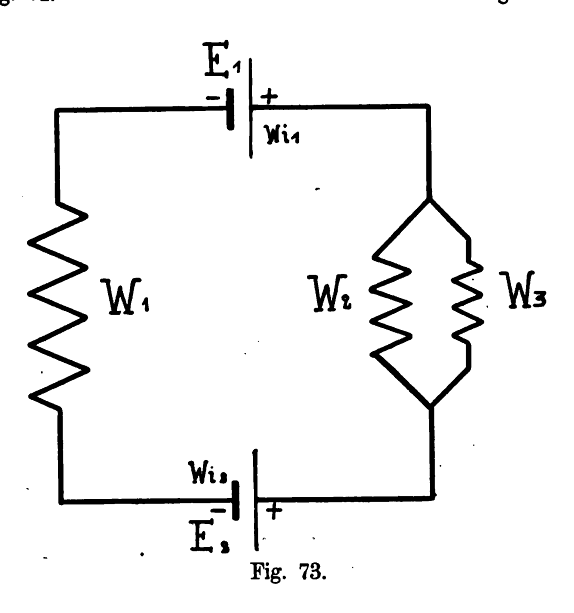


Fig. 73.

Fall 3 (Fig. 72): $$I = \frac{E_1 + (+E_2)}{w_{i_1} + W_2 + w_{i_2} + W_1}.$$

Fall 4 (Fig. 73): $$I = \frac{E_1 + (-E_2)}{w_{i_1} + \frac{W_2 \cdot W_3}{W_2 + W_3} + w_{i_2} + W_1}.$$

Fall 5 (Fig. 74): $$I = \frac{E}{w_i + W_1 + \frac{W_2 \cdot W_3 \cdot W_4}{W_3 W_4 + W_2 W_4 + W_2 W_3}}.$$

Fall 6. Berechnung der Stromstärke, welche bei den verschiedenen, Seite 52ff besprochenen Elementkombinationen zu erzielen ist, wenn der äußere Widerstand W Ohm beträgt.

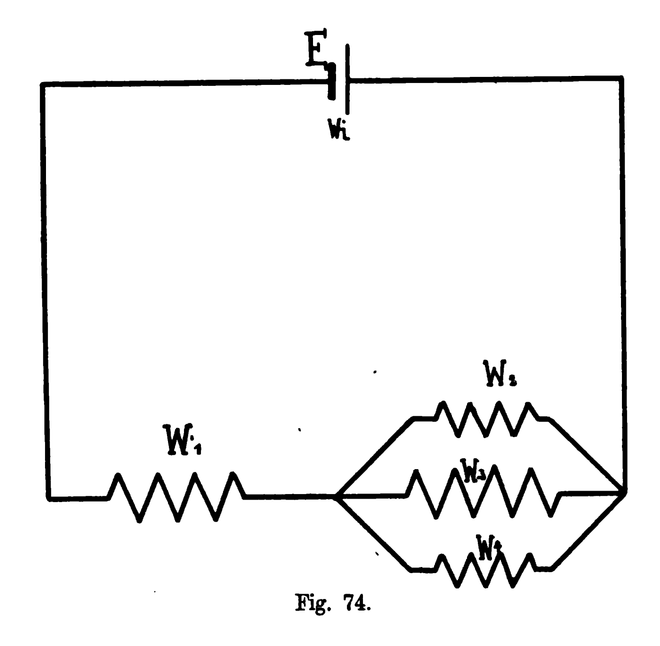


Fig. 74.

a) Serienschaltung von n Elementen von je e Volt EMK und je w_i Ohm innerem Widerstand:
$$I = \frac{n \cdot e}{n \cdot w_i + W}.$$

Aus dieser Formel ist zu ersehen, daß bei sehr geringem äußeren Widerstande W die Stromstärke durch Vermehrung der Elemente nicht wesentlich erhöht werden kann, da in diesem Falle der äußere Widerstand gegenüber $n \cdot w_i$ vernachlässigt werden kann, und der Nenner des Bruches (der innere Widerstand der Batterie) ebensovielmal (n mal) größer wird, wie der Zähler (die EMK der Batterie). Wohl aber wird eine Erhöhung der Stromstärke durch Vermehrung der Elemente erreicht, wenn umgekehrt der Widerstand der Elemente im Vergleich zum äußeren Widerstand klein ist.

b) Parallelschaltung von n Elementen von je e Volt EMK und je w_i Ohm innerem Widerstand.
$$I = \frac{e}{\frac{w_i}{n} + W}.$$

Diese Formel läßt erkennen, daß bei Parallelschaltung für einen geringen äußeren Widerstand die Stromstärke durch Vermehrung der Elemente erhöht wird, bei einem großen äußeren Widerstande hingegen keine erhebliche Steigerung der Stromstärke eintritt.

c) Serienparallelschaltung von n Elementen von je e Volt EMK und je w_i Ohm innerem Widerstand in m Gruppen parallel.

$$I = \frac{\frac{n}{m} \cdot e}{\frac{w_i \cdot n}{m \cdot m} + W} = \frac{(n \cdot e) \cdot m}{(n w_i) + m^2 \cdot W}.$$

Man sieht, daß man je nach der Kombination, d. h. je nach der Zahl m, verschiedene Stromstärken bei einem bestimmten W erhalten kann. Das

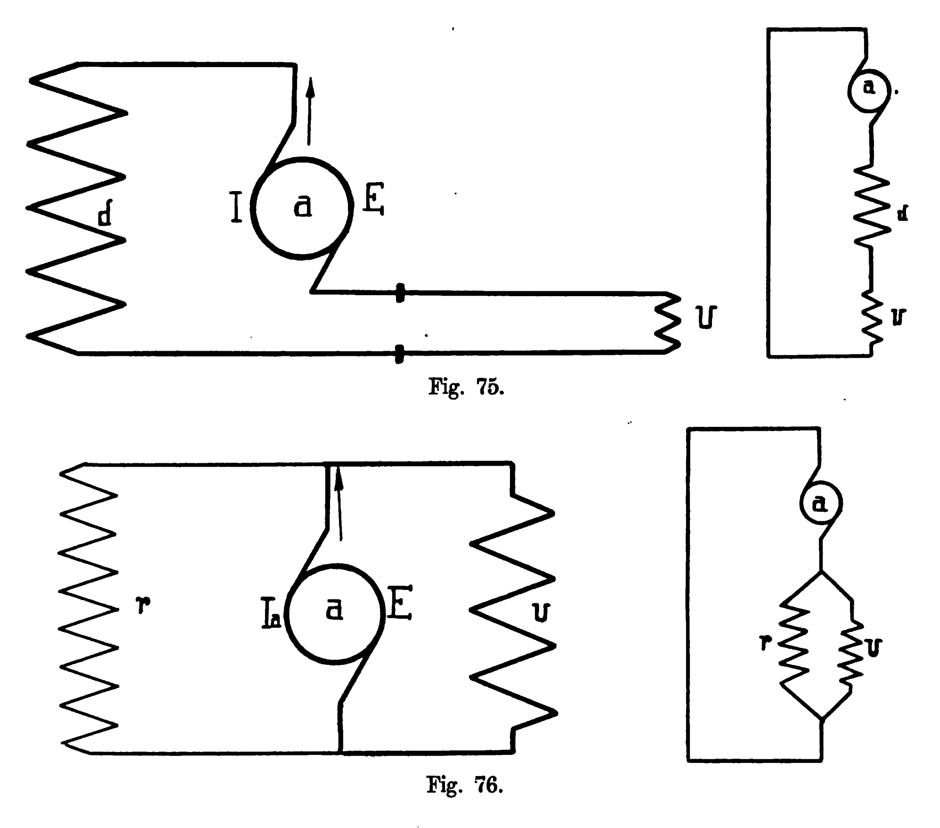


Fig. 75.

Fig. 76.

Maximum der Stromstärke erreicht man, wenn $w_i \cdot \frac{n}{m^2} = W$, d. h. innerer Widerstand gleich äußerer Widerstand ist. m muß also gleich $\sqrt{n \frac{w_i}{W}}$ sein, um bei einem bestimmten W die maximale Stromstärke zu erhalten.

Fall 7. Bei der Gleichstromdynamomaschine kann man den Ankerstromkreis und den Magneterregerstromkreis auf drei verschiedene Arten miteinander verbinden. Man unterscheidet in bezug auf diese innere Schaltung der Maschinen: a) Hauptstrommaschinen, b) Nebenschlußmaschinen, c) Compoundmaschinen.

a) Hauptstrommaschinen.

Ankerwiderstand a Ω, Magnetbewicklung d Ω und äußerer Widerstand u Ω sind in Serie geschaltet (Fig. 75).

$$I_a = I = \frac{E}{a + d + u}.$$

b) Nebenschlußmaschinen.

Die Magnetbewicklung (r Ω) ist ebenso wie der äußere Widerstand u vom Anker (a Ω) abgezweigt. Die Magnetbewicklung liegt also parallel zum äußeren Widerstand (nicht parallel zum Anker, siehe Fig. 76).

$$I_a = \frac{E}{a + \frac{r \cdot u}{r + u}}.$$

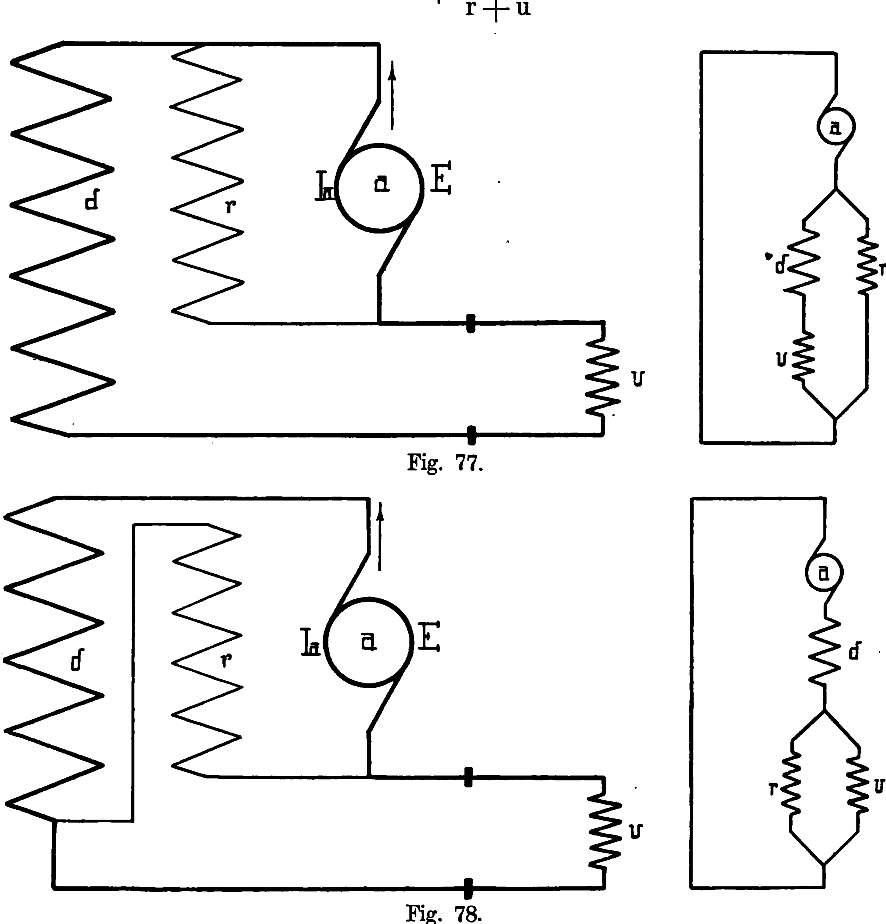


Fig. 77.

Fig. 78.

c) Compoundmaschinen.

Bei der Compoundmaschine sind zwei Magnetbewicklungen vorhanden, und zwar eine (d Ω) in Serie mit dem Anker (also vom Hauptstrom durchflossen), eine (r Ω) vom Nebenschlußstrom durchflossen. Man hat zwei Möglichkeiten der Schaltung (Fig. 77 und 78).

Für Fig. 77 wird: $I_a = \dfrac{E}{a + \dfrac{(u+d)\cdot r}{u+d+r}}$.

Für Fig. 78 wird: $I_a = \dfrac{E}{a + d + \dfrac{u \cdot r}{u+r}}$.

b) Das Ohmsche Gesetz für einzelne Teile des Stromkreises.

Betrachtet man den einfachen Stromkreis in Fig. 79, so ist klar, daß die gesamte elektromotorische Kraft $E = 100$ Volt aufgebraucht sein muß, wenn der Strom $I = \dfrac{E}{w_i + W_1 + W_2} = \dfrac{100}{0{,}5 + 2{,}5 + 1} = \dfrac{100}{4} = 25$ Ampere auf dem Wege durch die Batterie (Widerstand $w_i = 0{,}5\,\Omega$), durch $W_1 = 2{,}5\,\Omega$ und durch $W_2 = 1\,\Omega$ bis zur Batterie zurück fließt, daß also der Spannungsverbrauch oder Spannungsverlust im ganzen Stromkreis gleich der elektromotorischen Kraft ist.

Dieser Spannungsverlust oder Spannungsverbrauch berechnet sich nach dem Ohmschen Gesetz zu

$$E = I \cdot (w_i + W_1 + W_2)$$

oder

$$E = I \cdot w_i + IW_1 + IW_2.$$

Aus der letzten Gleichung folgt, daß die elektromotorische Kraft gleich ist der Summe der Spannungsverluste in den einzelnen hintereinandergeschalteten Widerständen.

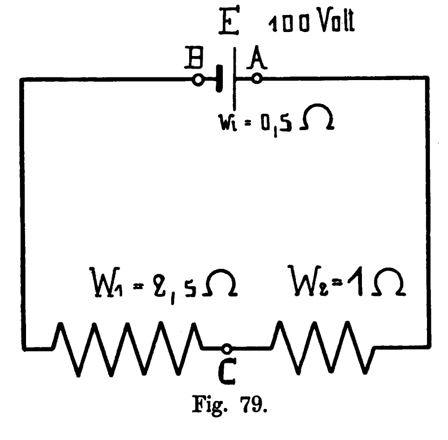


Fig. 79.

Trägt man in einem rechtwinkligen Koordinatensystem die Spannung als Ordinate, den Widerstand als Abszisse auf, so ergibt sich für den in Fig. 79 dargestellten Stromkreis das Fig. 80 gegebene Diagramm.

Für den Fig. 81 gezeichneten Stromkreis gilt die graphische Darstellung Fig. 82

$$I = \frac{E_1 + E_2 + (-E_3)}{w_{i_1} + W_1 + w_{i_2} + W_2 + w_{i_3} + W_3}$$

$$= \frac{100 + 50 - 75}{0{,}5 + 0{,}9 + 0{,}25 + 0{,}3 + 0{,}35 + 0{,}2}$$

$$= \frac{75}{2{,}5} = 30 \text{ Ampere.}$$

Man erkennt zunächst aus den Figuren 80 und 82, daß die trigonometrische Tangente des Winkels α gleich elektromotorische Kraft dividiert durch Widerstand, d. h. gleich der Stromstärke ist.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E}{W} = I.$$

Man erkennt aber ferner daraus, daß das Ohmsche Gesetz nicht nur für den ganzen Stromkreis, sondern auch für jeden beliebigen Teil desselben Gültigkeit hat; es lautet dann:

Die Stromstärke (I) ist gleich der Spannungsdifferenz (E_k)

zwischen zwei Punkten des Stromkreises, dividiert durch die Summe der zwischen diesen beiden Punkten in Serie geschalteten Widerstände (W).

$$I = \frac{E_k}{W}.$$

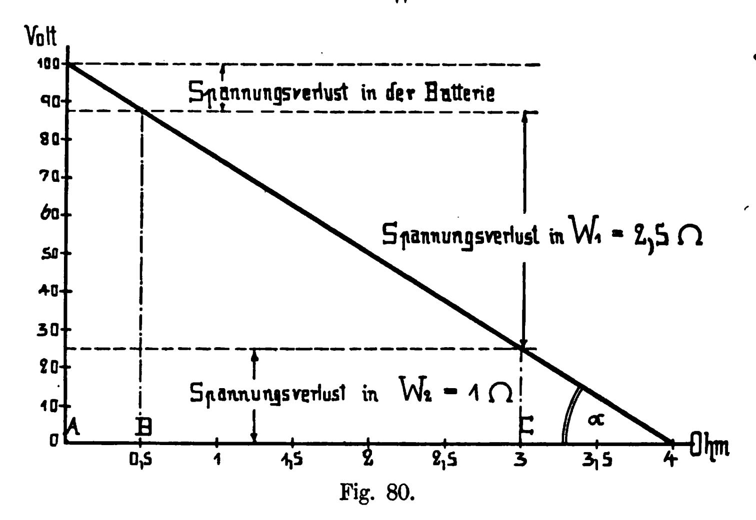


Fig. 80.

Wenn also an einem bestimmten Widerstand W eine bestimmte Spannungsdifferenz herrscht, so fließt durch den Widerstand ein Strom ganz bestimmter Stärke.

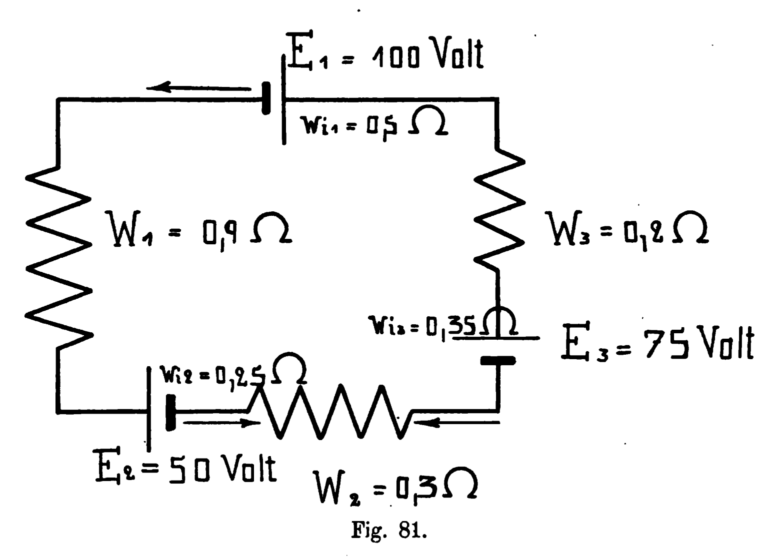


Fig. 81.

Umgekehrt kann man sagen, daß, wenn durch einen Widerstand W ein Strom I hindurchfließt, die Spannungsdifferenz

$$E_k = I \cdot W.$$

Und endlich kann man die Beziehung aufstellen, daß, wenn bei

einer Spannungsdifferenz E_k zwischen den Enden eines Widerstandes ein Strom I durch ihn hindurchfließt, die Größe dieses Widerstandes

$$W = \frac{E_k}{I}.$$

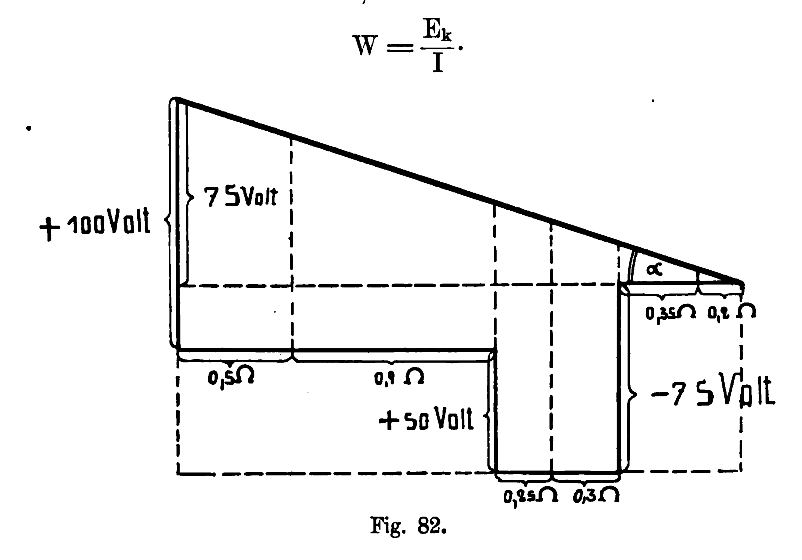


Fig. 82.

c) Klemmenspannung einer Stromquelle.

Während man als Klemmenspannung an einem stromverbrauchenden Widerstand (an einem Stromverbraucher) das Produkt aus Stromstärke und Widerstand bezeichnet, also

$$E_k = I \cdot W,$$

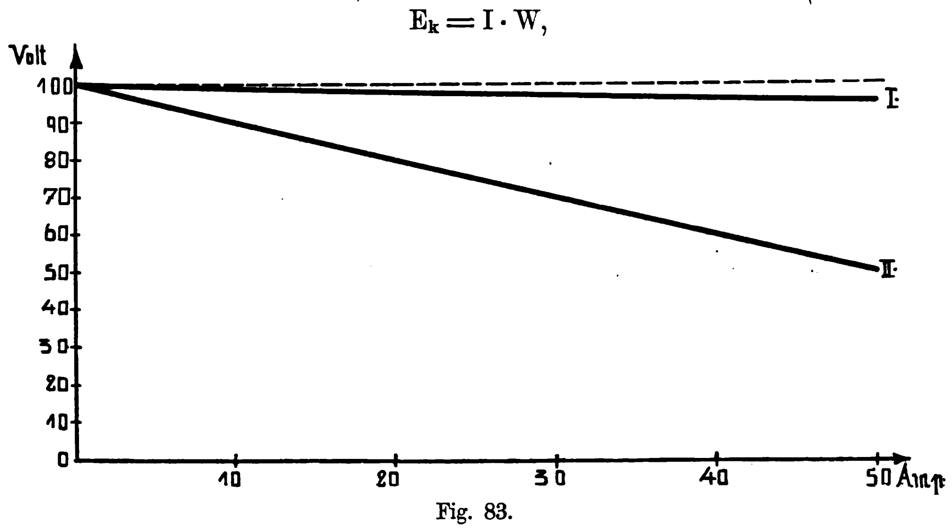


Fig. 83.

ist als Klemmenspannung einer stromliefernden Vorrichtung (Element, Maschine) die an den Klemmen des Stromerzeugers wirksame elektromotorische Kraft verstanden.

Wie schon in der Einleitung Seite 4 auseinandergesetzt, ist die Klemmenspannung eines arbeitenden Stromerzeugers stets kleiner als seine elektromotorische Kraft E, und zwar um denjenigen Betrag an Spannung,

welcher im Innern des Stromerzeugers beim Durchfließen des Stromes verloren geht. Dieser innere Spannungsverlust beträgt $I \cdot w_i$, so daß

$$E_k = E - I \cdot w_i.$$

Umgekehrt ist $E = E_k + I \cdot w_i$, eine Beziehung, welche deshalb wichtig ist, weil man meistens nicht E, sondern nur E_k zu messen imstande ist[1]).

Aus der Gleichung $E_k = E - I \cdot w_i$ geht ohne weiteres hervor, daß bei konstanter elektromotorischer Kraft die Klemmenspannung mit wechselnder Belastung (I) keinen konstanten Wert hat, sondern mit wechselnder Belastung sinkt.

Bei einer bestimmten Belastung I wird die Klemmenspannung um so kleiner sein, je größer der innere Widerstand des Stromerzeugers ist. Da für die nützliche Leistung eines Stromerzeugers nicht die elektromotorische Kraft E, sondern die Klemmenspannung E_k maßgebend ist, so erkennt man, daß es von der größten Wichtigkeit ist, daß der innere Widerstand einer Stromquelle möglichst niedrig ist.

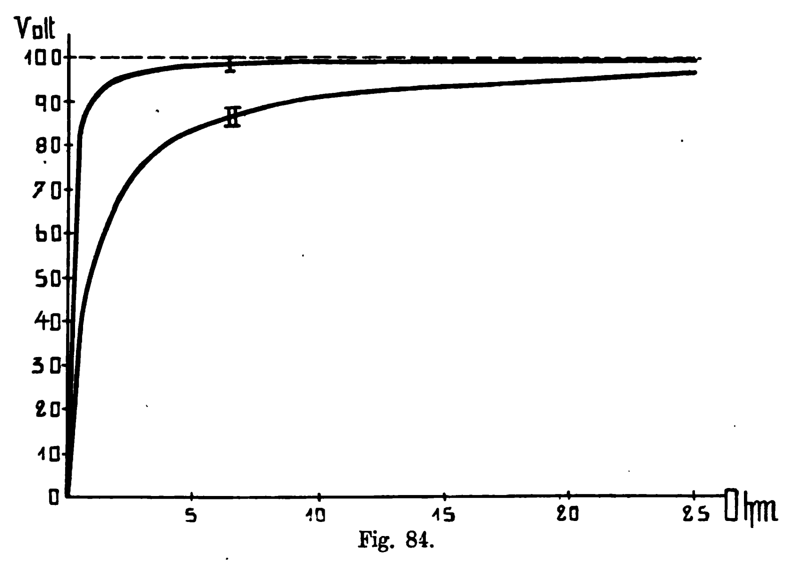


Fig. 84.

Fig. 83 und 84 lassen erkennen, wie sich die Klemmenspannung zweier Stromerzeuger, von denen jeder eine konstante EMK von 100 Volt liefert, mit der Belastung verändert. Stromerzeuger I hat 0,1 Ω, Stromerzeuger II dagegen 1 Ω inneren Widerstand, beide Stromerzeuger seien für maximal 50 Ampere bestimmt.

In Fig. 84 ist dargestellt, wie sich E_k mit W verändert. Wenn W größer wird, so fällt I; E_k steigt also mit zunehmendem W (d. h. mit abnehmender Belastung).

$I = \frac{E}{w_i + W}$, wobei W den Widerstand des äußeren Stromkreises bedeutet. Es ist also

$$E_k = E - \frac{E}{w_i + W} \cdot w_i = E\left(1 - \frac{w_i}{w_i + W}\right).$$

---

[1]) Bei nicht arbeitendem Stromerzeuger kann man E nur mit einem elektrostatischen Voltmeter (s. Heft 3) direkt messen, alle anderen Voltmeter verbrauchen Strom, so daß also der Stromerzeuger bei der Messung bereits beansprucht wird.

11. Stromverzweigungen und die Kirchhoffschen Gesetze.

In der Praxis wird ein Stromerzeuger selten seinen Strom nur durch einen einzigen, einheitlichen Leitungsdraht senden, vielmehr wird sich der Strom meist in mehrere Zweige verteilen. Das bedeutet, daß es sich in den meisten Stromkreisen nicht um eine reine Hintereinanderschaltung der Widerstände, sondern um gemischte Schaltungen, Hintereinanderschaltungen und Parallelschaltungen, handelt. Bei parallelgeschalteten Widerständen spricht man von einer Stromverzweigung.

Bei der einfachen, in Fig. 85 dargestellten Stromverzweigung ist nach dem Ohmschen Gesetz

$$I = \frac{E}{w_i + \frac{W_1 \cdot W_2}{W_1 + W_2}}.$$

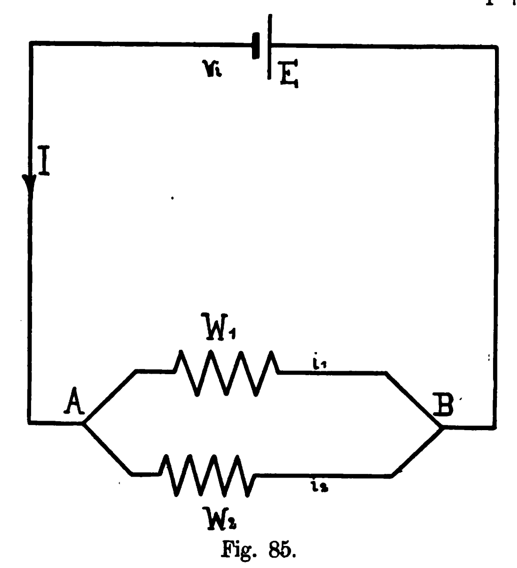


Fig. 85.

Zwischen den Punkten A und B herrscht eine Spannungsdifferenz E_k, für welche folgende Beziehungen gelten:

$$E_k = I \cdot \frac{W_1 \cdot W_2}{W_1 + W_2}$$
$$= i_1 \cdot W_1 = i_2 \cdot W_2\text{ [1]}.$$

Aus der Gleichung $i_1 \cdot W_1 = i_2 W_2$ folgt, daß $i_1 : i_2 = w_2 : w_1$, oder der Satz:

Bei einer Stromverzweigung verteilen sich die Stromstärken auf die einzelnen Zweige umgekehrt proportional den Leitungswiderständen der Zweige[2].

Die nachstehend aufgeführten beiden Kirchhoffschen Gesetze sind weiter nichts als eine Erweiterung bzw. Anwendung des Ohmschen Gesetzes. Sie gestatten ohne weiteres, auch in verwickelten Fällen die Verhältnisse zu übersehen.

Das erste Kirchhoffsche Gesetz lautet:

An jeder Verzweigungsstelle eines Stromkreises ist die Summe der ankommenden Ströme gleich der Summe der wegfließenden Ströme[3]. $\Sigma I = 0$.

---

[1]) Aus dieser Gleichung folgt das Seite 61 gegebene Gesetz für die Größe des Kombinationswiderstandes. Denn es ist $E_k = I \cdot X = i_1 \cdot W_1 = i_2 \cdot W_2$, wobei X den Kombinationswiderstand, d. h. den Widerstand zwischen den Punkten A und B bezeichnet. Daraus ergibt sich $I = \frac{E_k}{X}$; $i_1 = \frac{E_k}{w_1}$; $i_2 = \frac{E_k}{w_2}$; da nun $I = i_1 + i_2$ ist, so wird $I = \frac{E_k}{X} = \frac{E_k}{w_1} + \frac{E_k}{w_2}$ oder $\frac{1}{X} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2}$.

[2]) Dies gilt nicht nur für 2 Zweige, sondern für beliebig viele Zweige zwischen A und B, denn es ist immer

$$i_1 \cdot W_1 = i_2 \cdot W_2 = i_3 \cdot W_3 = i_4 \cdot W_4 \text{ usw.}$$

[3]) Diesen Satz kann man auch folgendermaßen fassen: An jeder Verzweigungsstelle eines Stromkreises ist die algebraische Summe der Stromstärken gleich Null, wenn man die nach der Verzweigungsstelle gerichteten Ströme positiv und die von derselben fortfließenden Ströme negativ rechnet.

Das zweite Kirchhoffsche Gesetz lautet:

In jeder verzweigten Strombahn ist für jeden in sich selbst zurückgeführten Weg die Summe der elektromotorischen Kräfte gleich der Summe der Produkte aus Stromstärke und Widerstand für jeden Leitungsteil. Die elektromotorischen Kräfte und Stromstärken sind hierbei mit dem ihrer Richtung entsprechenden Vorzeichen zu nehmen. $\Sigma E = \Sigma IW$.

Das erste Gesetz, auf Fig. 85 angewendet, ergibt die Gleichung

$$I = i_1 + i_2.$$

Kombiniert man diese Gleichung mit der Gleichung

$$i_1 \cdot W_1 = i_2 W_2,$$

so kann man aus I, W_1 und W_2 die Größe der Teilströme,
„ I, i_1 und i_2 die Größe der Zweigwiderstände
berechnen.

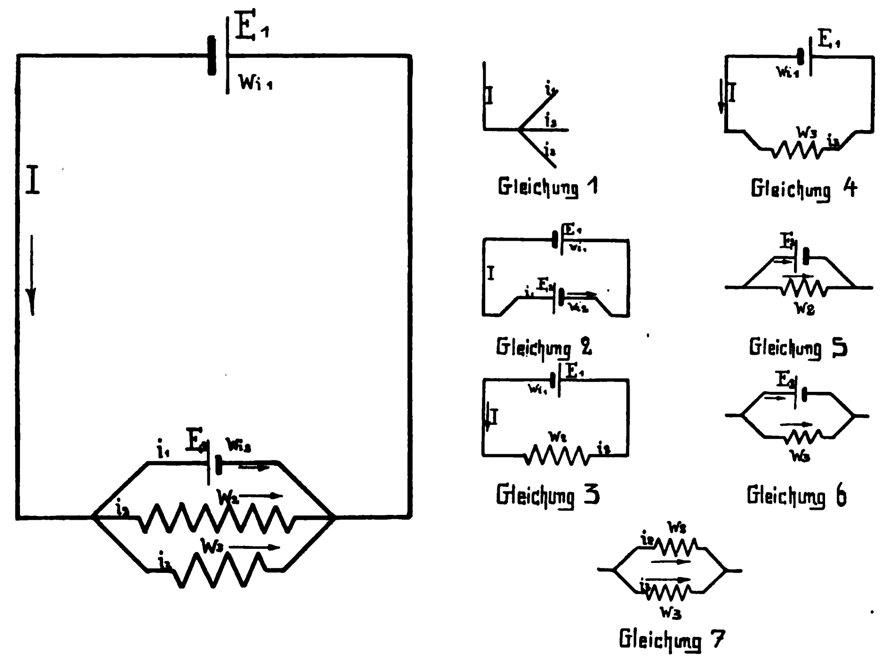


Fig. 86.

Es ist $$\frac{i_1}{i_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_2 \cdot x}{W_1 \cdot x},$$

worin x ein Proportionalitätsfaktor ist. Man kann also setzen

$$i_1 = W_2 \cdot x, \quad i_2 = W_1 \cdot x,$$

$$I = i_1 + i_2 = x(W_2 + W_1),$$

$$x = \frac{I}{W_1 + W_2},$$

$$i_1 = \left(\frac{I}{W_1 + W_2}\right) \cdot W_2, \quad i_2 = \left(\frac{I}{W_1 + W_2}\right) \cdot W_1$$

Das zweite Gesetz, auf Fig. 85 angewendet, ergibt die Gleichung

$$E = I \cdot w_i + i_1 W_1 = I \cdot w_i + i_2 W_2$$

und

$$i_1 \cdot W - i_2 W = 0.$$

Das Kirchhoffsche Gesetz gilt auch noch, wenn in einzelnen Teilen der Stromverzweigung noch elektromotorische Kräfte enthalten sind.

Für Fig. 86 gilt

1. $I = i_1 + i_2 + i_3,$
2. $E_1 + E_2 = I \cdot w_{i_1} + i_1 \cdot w_{i_2},$
3. $E_1 = I \cdot w_{i_1} + i_2 \cdot W_2,$
4. $E_1 = I\, w_{i_1} + i_3\, W_3,$
5. $E_2 = i_1 \cdot w_{i_2} - i_2\, W_2,$
6. $E_2 = i_1\, w_{i_2} - i_3\, W_3,$
7. $i_2 \cdot W_2 = i_3 \cdot W_3.$

Dabei sind die Stromrichtungen so angenommen, wie in der Fig. 86 durch Pfeile angedeutet. Ergibt die Rechnung einen positiven Wert, so ist die angenommene Stromrichtung richtig gewesen, ergibt dagegen die Rechnung einen negativen Wert, so ist die Richtung des Stromes entgegengesetzt der Pfeilrichtung.

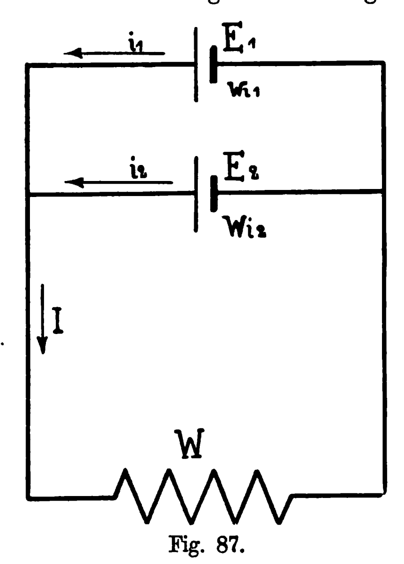


Fig. 87.

Da die Kirchhoffschen Gesetze über jede Art von Stromverzweigung Aufschluß geben, so kann man auch leicht ermitteln, wie sich die Verhältnisse gestalten, wenn man mehrere Stromquellen mit verschieden großen elektromotorischen Kräften in Parallelschaltung auf einem gemeinsamen äußeren Stromkreis arbeiten läßt.

Für Fig. 87, wo beispielsweise zwei parallel arbeitende Stromquellen angenommen sind, ergibt sich

1. $E_1 = i_1 \cdot w_{i_1} + I\, W,$
2. $E_2 = i_2 \cdot w_{i_2} + I\, W,$
3. $E_1 - E_2 = i_1\, w_{i_1} - i_2 \cdot w_{i_2},$
4. $i_1 + i_2 = I.$

Aus Gleichung 1. folgt $i_1 = \dfrac{E_1 - I\,W}{w_{i_1}}$,

aus Gleichung 2. folgt $i_2 = \dfrac{E_2 - I\,W}{w_{i_2}}$,

folglich

$$i_1 + i_2 = I = \frac{E_1 - I\,W}{w_{i_1}} + \frac{E_2 - I\,W}{w_{i_2}},$$

$$I = \frac{E_1 \cdot w_{i_2} + E_2\, w_{i_1}}{w_{i_1} \cdot w_{i_2} + W\,(w_{i_1} + w_{i_2})}.$$

Ist $E_1 = E_2 = E$ und $w_{i_1} = w_{i_2} = w_i$, d. h. sind die beiden parallelgeschalteten Stromquellen einander gleich, so ist

$$I = \frac{2 \cdot E \cdot w_i}{w_i^2 + W \cdot 2 \cdot w_i} = \frac{E}{W + \frac{w_i}{2}}.$$

Es wird $i_2 = 0$, folglich $i_1 = I$, wenn

$$E_2 = I W \text{ (nach Gleichung 2.), oder wenn}$$

$$E_1 - E_2 = i_1 \cdot w_{i_1} = I w_{i_1} \text{ (nach Gleichung 3.),}$$

d. h. wenn die Differenz $E_1 - E_2$ gleich dem Spannungsverlust im Element I ist, dann ist Element II stromlos.

Es kann auch z. B. i_2 negativ werden, und zwar dann, wenn $i_1 \cdot w_{i_1} < E_1 - E_2$; d. h. wenn die Differenz $E_1 - E_2$ größer ist als der Spannungsverlust im Element I, dann liefert das Element II keinen Strom, sondern empfängt einen Strom.

Beispiel (Fig. 88): $E_1 = 100$ Volt, $w_{i_1} = 0{,}1\,\Omega$,
$E_2 = 90$ „ $w_{i_2} = 0{,}2\,\Omega$.

$$I = \frac{100 \cdot 0{,}2 + 90 \cdot 0{,}1}{0{,}02 + 0{,}3 \,.\, W} = \frac{29}{0{,}02 + 0{,}3\,W},$$

$$i_2 = \frac{I \cdot w_{i_1} - (E_1 - E_2)}{w_{i_1} + w_{i_2}} = \frac{I - 100}{3}$$ (negativ, solange als $I < 100$ Ampere ist).

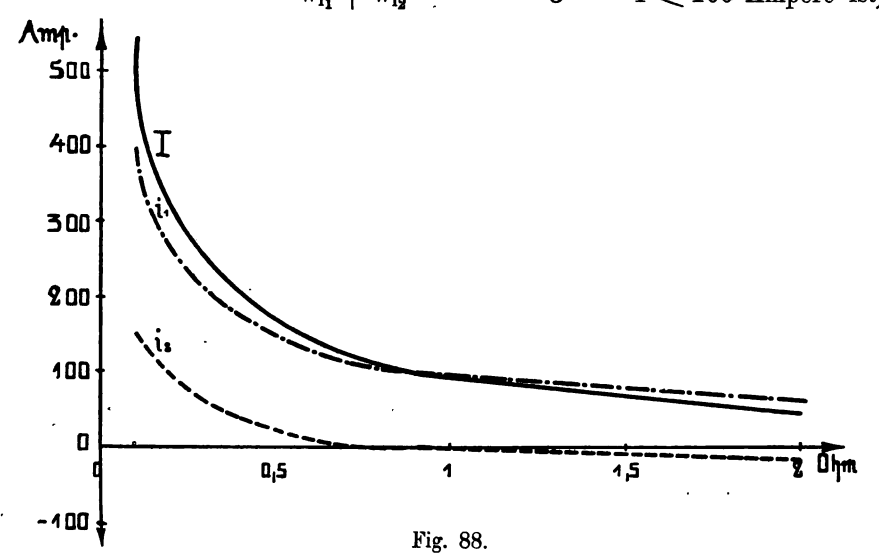


Fig. 88.

W	I	i_1	i_2
∞	0	+ 33,33	— 33,33
100	0,96	+ 33,97	— 33,01
50	1,93	+ 34,62	— 32,69
25	3,86	+ 35,91	— 32,05
5	19,0	+ 46	— 27
2	47	+ 64,6	— 17,6
1	91	+ 94	— 3
0,9	100	+ 100	0
0,5	170	+ 146,7	+ 23,3
0,1	540	+ 393	+ 147
0	1450	+ 1000	+ 450

Man erkennt aus dieser Tabelle und den vorstehenden Formeln, daß beim Parallelschalten von Stromquellen mit nicht genau gleichen elektromotorischen Kräften bei geringer Belastung und bei Leerlauf ($W = \infty$) Ströme auftreten, welche der kleineren EMK entgegenlaufen (Elemente werden durch diese Ausgleichsströme geladen), bei Dynamomaschinen würde die Maschine mit der kleineren EMK Rückstrom bekommen, d. h. als Motor laufen.

12. Leistung, Arbeit, Wirkungsgrad.

a) Elektrische Leistung und Arbeit.

Unter elektrischer Leistung oder Effekt[1]) versteht man das Produkt aus Stromstärke und Spannung. Die Einheit der elektrischen Leistung ist das Watt, und zwar ist

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Ampere},$$

somit

$$\text{Wattzahl} = \text{Spannung} \times \text{Stromstärke} = E \times I.$$

Setzt man in diese Formel $E = I \cdot W$, so erhält man

$$\text{Wattzahl} = I \cdot W \cdot I = I^2 \cdot W.$$

Setzt man in obige Formel $I = \frac{E}{W}$, so erhält man

$$\text{Wattzahl} = E \cdot \frac{E}{W} = \frac{E^2}{W}.$$

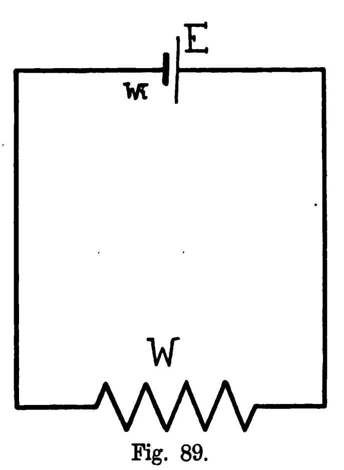


Fig. 89.

Unter elektrischer Arbeit[1]) versteht man eine elektrische Leistung während einer bestimmten Zeit T (Sekunden). Die Einheit der elektrischen Arbeit ist die Wattsekunde, und zwar ist

$$1 \text{ Wattsekunde} = 1 \text{ Watt} \times 1 \text{ Sek.},$$

somit

$$\text{Wattsekundenzahl} = E \cdot I \cdot T = I^2 \cdot W \cdot T = \frac{E^2}{W} \cdot T.$$

Da 3600 Wattsekunden = 1 Wattstunde, so ist die Wattstundenzahl

$$= \frac{E \cdot I \cdot T}{3600} = \frac{I^2 \cdot W \cdot T}{3600} = \frac{E^2 \cdot T}{W \cdot 3600}.$$

Elektrischer Effekt oder elektrische Leistung ist also die Arbeit während der Zeiteinheit.

In einem geschlossenen Stromkreis setzt die elektromotorische Kraft E den Strom I in Bewegung. Die in diesem Kreise in der Zeiteinheit geleistete Arbeit oder der Effekt ist dann $E \cdot I$. Dieser Effekt verteilt sich auf die einzelnen Teile des Stromkreises; Auskunft über die Verteilung gibt das Ohmsche Gesetz.

In dem Stromkreis Fig. 89 ist

$$I = \frac{E}{w_i + W}$$

oder

$$E = I \cdot (w_i + W) = I \cdot w_i + I \cdot W:$$

Multipliziert man beide Seiten dieser Gleichung mit I, so erhält man

$$I \cdot E = I^2 \cdot w_i + I^2 \cdot W.$$

Die gesamte Leistung (Gesamtleistung) zerfällt also in zwei Teile, und zwar ist

$I^2 \cdot w_i$ die Leistung, welche in der Stromquelle verloren geht (der Verlust),
$I^2 \cdot W$ die nützliche Leistung im äußeren Stromkreis (die Nutzleistung).

---

[1]) Siehe auch Seite 32.

b) Elektrisches Güteverhältnis.

Unter elektrischem Güteverhältnis oder elektrischem Wirkungsgrad versteht man diejenige Zahl η, welche angibt, welcher Teil der gesamten aufgewendeten Leistung nutzbar gemacht wird. Man kann also folgende Gleichung aufstellen:

$$\eta \times \text{Gesamtleistung} = \text{Nutzleistung},$$

oder, da Gesamtleistung stets gleich ist der Summe aus Nutzleistung und Verluste, so ist

$$\eta \times (\text{Nutzleistung} + \text{Verlust}) = \text{Nutzleistung}.$$

Folglich ist

$$\eta = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Gesamtleistung}} = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Nutzleistung} + \text{Verluste}}.$$

Für den Stromkreis der Fig. 89 ist der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{I^2 \cdot W}{I^2 \cdot W + I^2 \cdot w_i} = \frac{W}{W + w_i}.$$

Setzt man $I W = E_k$, so ist $I^2 W = I E_k$, und es wird

$$\eta = \frac{I \cdot E_k}{I \cdot E} = \frac{E_k}{E}.$$

Bei einer Hauptstrommaschine (siehe Fig. 75 auf Seite 64) ist

$$\eta = \frac{I^2 \cdot u}{I^2 \cdot a + I^2 \cdot d + I^2 \cdot u} = \frac{u}{a + d + u},$$

$$\text{oder } \eta = \frac{E_k \cdot I}{E \cdot I} = \frac{E_k}{E}.$$

Bei einer Nebenschlußmaschine (siehe Fig. 76 auf Seite 64) ist

$$\eta = \frac{I_u^2 \cdot u}{I_a^2 \cdot a + I_r^2 \cdot r + I_u^2 u} = \frac{I_u \cdot E_k}{I_a \cdot E}.$$

Bei einer Compoundmaschine (siehe Fig. 77 und 78 auf Seite 65) ist

$$\eta = \frac{I_u^2 \cdot u}{I_a^2 \cdot a + I_u^2 \cdot (a + d) + I_r^2 \cdot r} = \frac{I_u \cdot E_k}{I_a \cdot E} \text{ (Fig. 77)},$$

$$\eta = \frac{I_u^2 \cdot u}{I_a^2 (a + d) + I_u^2 \cdot u + I_r^2 \cdot r} = \frac{I_u \cdot E_k}{I_a \cdot E} \text{ (Fig. 78)}.$$

Bei der Serienschaltung von n Elementen (siehe Seite 52) ist

$$\eta = \frac{I^2 \cdot W}{I^2 \cdot (n \cdot w_i + W)} = \frac{W}{n \cdot w_i + W} = \frac{1}{\frac{n \cdot w_i}{W} + 1}.$$

Bei der Parallelschaltung von n Elementen (siehe Seite 52) ist

$$\eta = \frac{E_k}{E} = \frac{E_k}{E_k + I \cdot \frac{w_i}{n}} = \frac{I \cdot W}{I \cdot \left(W + \frac{w_i}{n}\right)} = \frac{W}{W + \frac{w_i}{n}} = \frac{1}{1 + \frac{w_i}{n \cdot W}}.$$

Bei der Serienparallelschaltung von n Elementen in m Gruppen (siehe Seite 53) ist

$$\eta = \frac{W}{W + \frac{w_i \cdot n}{m \cdot m}} = \frac{1}{1 + \frac{w_i \cdot n}{W \cdot m^2}}.$$

Um mit n Elementen einen möglichst guten Wirkungsgrad zu erhalten, muß

bei der Serienschaltung $\frac{n \cdot w_i}{W}$ möglichst klein sein,

„ „ Parallelschaltung $\frac{w_i}{n \cdot W}$ „ „ „

„ „ Serienparallelschaltung $\frac{w_i \cdot n}{W} \cdot \frac{1}{m^2}$ „ „ „

c) Totaler Wirkungsgrad.

Bei dynamoelektrischen Maschinen kommen außer den elektrischen Verlusten noch andere hinzu (Hysteresis-, Wirbelstrom- und Reibungsverluste). Das Verhältnis der Nutzleistung einer Dynamomaschine zu der gesamten an der Riemenscheibe zugeführten mechanischen Leistung nennt man den totalen Wirkungsgrad η_{tot}.

$$\eta_{tot} = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{Nutzarbeit} + \text{Verluste}} = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{Gesamtarbeit}}.$$

Wenn eine Maschine a Watt nutzbar leistet ($E_k \cdot I$) und dazu b PS verbraucht (Gesamtarbeit also b · 736 Watt), so ist

$$\eta_{tot} = \frac{a}{b \cdot 736}$$ [1].

Zur schnelleren Berechnung des Wirkungsgrades aus der Wattzahl diene folgende Tabelle:

Wirkungsgrad in %	75	76	77	78	79	80	81	82	83
Wattleistung der Dynamomaschine pro PS	550	560	565	575	580	590	595	605	610
Wirkungsgrad in %	84	85	86	87	88	89	90	91	92
Wattleistung der Dynamomaschine pro PS	620	625	635	640	650	655	660	670	675

Wenn eine Anlage aus mehreren Teilen, z. B. I, II, III und IV besteht und der totale Wirkungsgrad der einzelnen Teile beträgt η_I, η_{II}, η_{III} und η_{IV}, so ist der Gesamtwirkungsgrad gleich dem Produkte der Wirkungsgrade der einzelnen Teile:

$$\eta_{gesamt} = \eta_I \cdot \eta_{II} \cdot \eta_{III} \cdot \eta_{IV}$$ [2].

[1]) Für den Fall, daß die Dynamomaschine mit der nominellen Leistung, für welche sie gebaut ist, beansprucht wird, gelten für dieselbe nachstehende Wirkungsgrade:

für Dynamomaschinen von 6—10 PS ca. 75—80 %
„ „ „ 15—50 „ „ 80—90 %
„ noch größere Maschinen . . . . . 91 % und darüber,

entnimmt man geringere Energiemengen, so nimmt das Güteverhältnis mit der Beanspruchung ab, da sich gewisse Verluste in der Maschine bei jeder Beanspruchung gleich bleiben. Die Höhe der Wirkungsgrade für eine bestimmte Leistung unterhalb der normalen läßt sich annähernd aus folgenden Angaben bestimmen:

a) Zwischen $^1/_1$ und $^3/_4$ der nominellen Leistung: Wirkungsgrad annähernd so hoch, wie bei einer entsprechend kleineren Maschine, die mit der betreffenden Leistung normal beansprucht ist.

b) Zwischen $^3/_4$ und $^1/_2$ Leistung: 1 % geringer,
c) „ $^1/_2$ „ $^1/_3$ „ 2—3 % „
d) „ $^1/_3$ „ $^1/_4$ „ 3—5 % „

[2]) Beweis: Die Gesamtarbeit in Teil I sei X, dann ist die Nutzarbeit in Teil I gleich $X \cdot \eta_I$, diese $X \eta_I$ Arbeitseinheiten werden an Teil II als Gesamtarbeit abgegeben, die Nutzarbeit in Teil II beträgt dann $(X \eta_I) \cdot \eta_{II} = X \cdot \eta_I \cdot \eta_{II}$. Diese Arbeitseinheiten werden an Teil III als Gesamtarbeit abgegeben, die Nutzarbeit in Teil III beträgt $(X\, \eta_I \cdot \eta_{II}) \cdot \eta_{III} = X \cdot \eta_I \cdot \eta_{II} \cdot \eta_{III}$; entsprechend beträgt die Nutzarbeit des Teiles IV $X \cdot \eta_I \cdot \eta_{II} \cdot \eta_{III} \cdot \eta_{IV}$.

$$\eta_{gesamt} = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{Gesamtarbeit}} = \frac{X \cdot \eta_I \cdot \eta_{II} \cdot \eta_{III} \cdot \eta_{IV}}{X} = \eta_I \cdot \eta_{II} \cdot \eta_{III} \cdot \eta_{IV}.$$

13. Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Arbeit.

Nach Seite 92 besteht zwischen einem Magneten und einem stromdurchflossenen Leiter eine Wechselwirkung. Sobald ein Dynamoanker vom Strom durchflossen wird, d. h. sobald man dem Anker durch die Bürsten Strom zuführt, wird dieser zu einem Magneten, auf welchem das Kraftlinienfeld des Hauptfeldes anziehend bzw. abstoßend einwirkt. Sendet man in den Anker (Fig. 90) einen Strom in der angegebenen Richtung (links in die Papierebene hinein, rechts aus der Papierebene heraus), so entsteht im Anker oben ein Südpol S′ und unten ein Nordpol N′, da der Anker einfach ein Solenoid mit Eisenkern darstellt.

Da der Südpol S′ vom Nordpol N des Hauptfeldes angezogen, vom Südpol S des Hauptfeldes abgestoßen, und da ganz analoge Kräfte auf den Nordpol N′ wirken, wird der Anker in Rotation kommen, und zwar in der durch den Pfeil angegebenen Richtung (mit dem Uhrzeiger).

Fig. 90.

Kehrt man die Stromrichtung im Anker um und behält die Polarität des Hauptfeldes bei (Fig. 91), so kehrt sich die Drehrichtung des Ankers um, dasselbe geschieht, wenn man die Polarität des Hauptfeldes umkehrt und die Stromrichtung im Anker beibehält (Fig. 92).

Kehrt man dagegen gleichzeitig die Stromrichtung im Anker und die Polarität des Hauptfeldes um (Fig. 93), so bleibt die Drehrichtung des Ankers unverändert.

Fig. 91.

Ein Elektromotor ist die Umkehrung einer Dynamomaschine. Würde man den Anker durch eine äußere Kraft in dem in Fig. 90 bis 93 angebenen Sinne in den daselbst bezeichneten Magnetfeldern drehen, so würde ein Strom in umgekehrter Richtung durch den Anker fließen, wie man leicht nach der Rechtehandregel (Seite 34) feststellen kann. Für die Bestim-

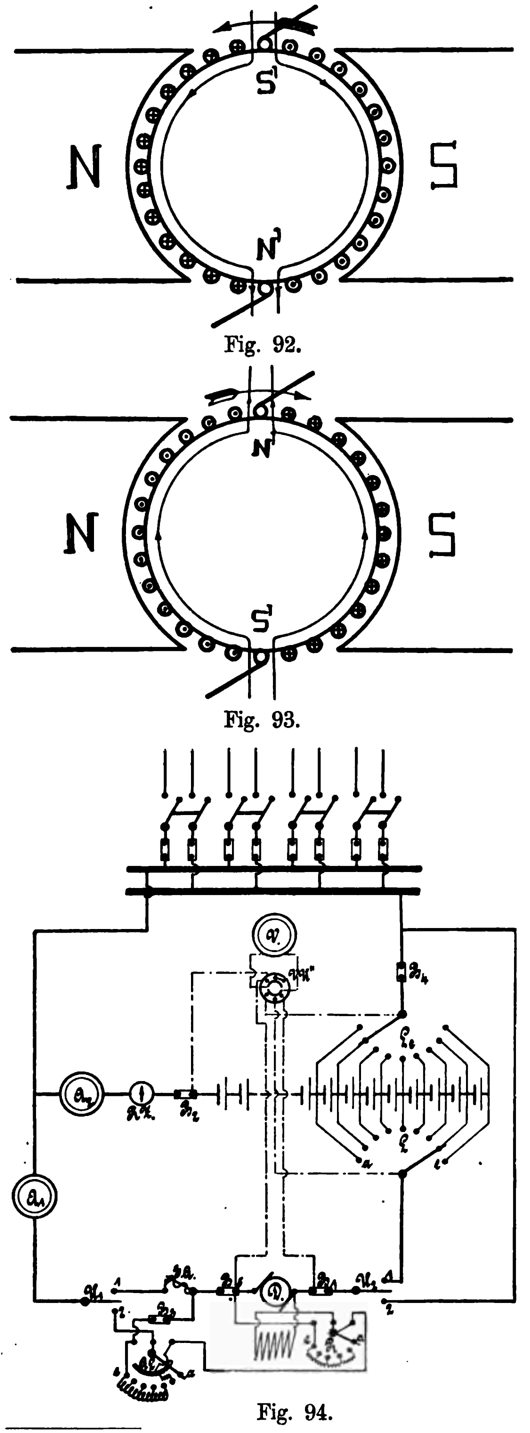


Fig. 92.

Fig. 93.

Fig. 94.

mung der Drehrichtung eines Motorankers muß man daher die Linkehandregel[1]) verwenden, welche analog der Rechtehandregel lautet:

Man halte die Handfläche der linken Hand den Kraftlinien entgegen, also nach dem Nordpol zu, die Fingerspitzen in die Stromrichtung, so zeigt der ausgestreckte Daumen die Drehrichtung des Ankers an.

Die Umkehrbarkeit der dynamoelektrischen Maschine wird beispielsweise in Elektrizitätserzeugungsanlagen mit Gasmaschinenantrieb benutzt. Gasmaschinen laufen nicht von allein an, sondern müssen angedreht werden. Ist eine Akkumulatorenbatterie vorhanden, so kann man nach den Schaltungen Fig. 94 und 95 die Nebenschlußmaschine zunächst als Motor von der Akkumulatorenbatterie antreiben (entweder mit Anlasser Fig. 94 oder mit Zellenschalter Fig. 95). Hat dann die Gasmaschine gezündet, so treibt sie ihrerseits die Dynamo, und diese arbeitet jetzt parallel zu der Batterie aufs Netz. Bei der Nebenschlußmaschine bleibt die Stromrichtung in der Magnetwicklung unverändert, wenn die Maschine in derselben Drehrichtung einmal als Motor, dann als Dynamo läuft (Fig. 96).

Die Wechselwirkung zwischen Hauptfeld und Ankerfeld äußert sich in einer rein mechanischen Kraft, so daß also der Anker des Motors durch eine rein mechanische Kraft in einem Magnetfeld bewegt wird. Die Ankerleiter schneiden dabei die Kraftlinien des Hauptfeldes, was

[1]) Also bei Dynamomaschinen und allen anderen Kraftlinienbestimmungen: Rechte Hand! Nur bei Motoren: Linke Hand!

zur Folge hat, daß in dem Anker eine elektromotorische Kraft induziert wird, deren Richtung, wie oben nach der Rechtehandregel festgestellt

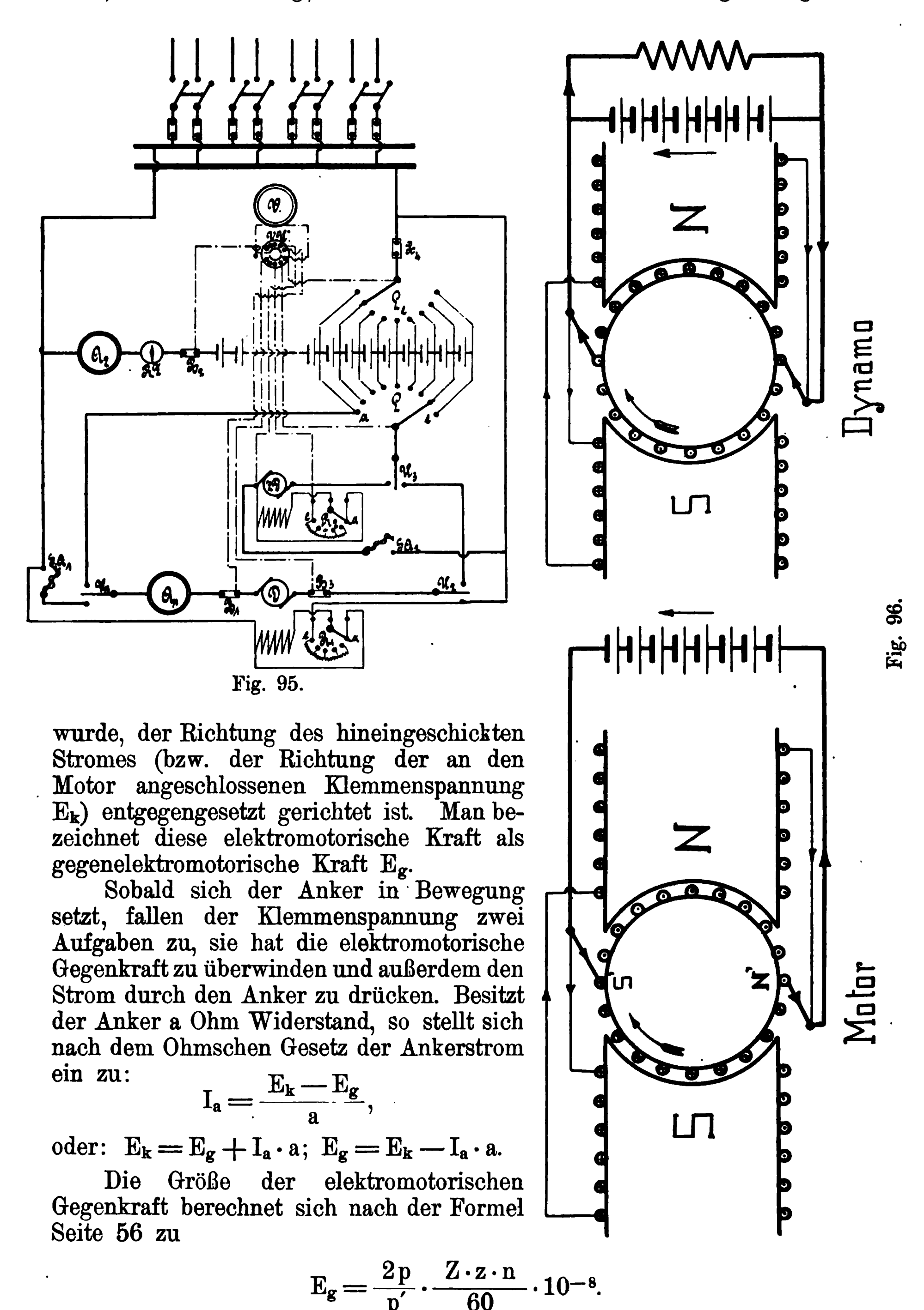


Fig. 95.

Fig. 96.

wurde, der Richtung des hineingeschickten Stromes (bzw. der Richtung der an den Motor angeschlossenen Klemmenspannung E_k) entgegengesetzt gerichtet ist. Man bezeichnet diese elektromotorische Kraft als gegenelektromotorische Kraft E_g.

Sobald sich der Anker in Bewegung setzt, fallen der Klemmenspannung zwei Aufgaben zu, sie hat die elektromotorische Gegenkraft zu überwinden und außerdem den Strom durch den Anker zu drücken. Besitzt der Anker a Ohm Widerstand, so stellt sich nach dem Ohmschen Gesetz der Ankerstrom ein zu:

$$I_a = \frac{E_k - E_g}{a},$$

oder: $E_k = E_g + I_a \cdot a$; $E_g = E_k - I_a \cdot a$.

Die Größe der elektromotorischen Gegenkraft berechnet sich nach der Formel Seite 56 zu

$$E_g = \frac{2p}{p'} \cdot \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8}.$$

Da bei einem fertigen Motor $\frac{2p \cdot z}{p' \cdot 60} \cdot 10^{-8} = C$ ein konstanter Zahlenfaktor ist, so kann man schreiben:

$$E_g = C \cdot Z \cdot n,$$

d. h. die elektromotorische Gegenkraft ist proportional dem Produkt aus Kraftlinienzahl und Tourenzahl.

Es ist also:

$$E_g = C \cdot Z \cdot n = E_k - I_a a.$$

Bezüglich des Drehmomentes, welches ein Anker entwickeln kann, gilt folgendes:

Zieht man von der Leistung ($E_k \cdot I$), die ein Motor aufnimmt, die Wattverluste im Anker und der Magnetbewicklung ab, so stellt der Rest den Betrag dar, welcher in mechanische Leistung umgesetzt werden kann. Dieser Betrag ist gegeben durch das Produkt Ankerstrom (I_a) mal elektromotorische Gegenkraft (E_g), also durch $I_a \cdot E_g$. In diesem Betrag ist aber nicht nur die Nutzleistung enthalten, sondern auch noch die Leistung, die von der Hysteresis, den Wirbelströmen und den mechanischen Reibungen verzehrt wird. Ist nun M_d das vom Anker erzeugte Drehmoment in mkg und ω die Winkelgeschwindigkeit, so ist $M_d \cdot \omega$ die Leistung in mkg pro Sekunde oder $9{,}81 \cdot M_d \cdot \omega$ die Leistung in Watt. Die Winkelgeschwindigkeit ω ist von der Tourenzahl abhängig, und zwar läßt sich die Beziehung aufstellen $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$. Setzt man für ω diesen Wert ein, und berücksichtigt, daß diese Leistung vom Anker entwickelt wird, so gilt die Gleichung:

$$9{,}81\, M_d \frac{2\pi \cdot n}{60} = I_a \cdot E_g = I_a \cdot \frac{2p}{p'} \cdot \frac{Z \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-8},$$

folglich

$$M_d = \frac{2 \cdot p \cdot z \cdot 10^{-8}}{p' \cdot 2 \cdot \pi \cdot 9{,}81} \cdot Z \cdot I_a = C' \cdot Z \cdot I_a,$$

d. h. das Drehmoment ist proportional dem Produkt aus Kraftlinienzahl und Ankerstrom.

Die Beziehungen zwischen Drehmoment und Tourenzahl [1]) sind also durch die beiden Formeln gegeben:

$$1.\ C \cdot Z \cdot n = E_k - I_a \cdot a. \qquad 2.\ M_d = C' \cdot Z \cdot I_a.$$

Die in mechanische Leistung umgesetzte elektrische Leistung ist $E_g \cdot I_a$, die zugeführte elektrische Leistung $E_k \cdot I$. Das elektrische Güteverhältnis η ist demnach:

$$\eta = \frac{E_g \cdot I_a}{E_k \cdot I}.$$

Um dieses Güteverhältnis recht günstig zu gestalten, darf E_g wenig von E_k abweichen. Da $E_k = E_g + I_a \cdot a$ ist, I_a aber durch das geforderte Drehmoment bedingt ist, so folgt, daß der Ankerwiderstand a so klein wie möglich gemacht werden muß.

Da $I = \frac{E_k - E_g}{a}$, E_g bei Stillstand des Motors gleich Null, a sehr klein, z. B. 0,1 Ω, E_k meist groß (110, 220, 440 Volt), so würde $I = \frac{E_k}{a}$

---

[1]) Näheres darüber ist in Heft 8 angegeben.

sehr hoch werden, wenn man die volle Spannung E_k auf den ruhenden Ankerwiderstand a schalten würde. Um dies zu vermeiden, darf ein Elektromotor nur unter Vorschaltung eines Anlassers (A) in Betrieb gesetzt werden (Fig. 97).

Der totale Wirkungsgrad η_{tot} eines Elektromotors ist das Verhältnis der an der Riemenscheibe des Motors verfügbaren Leistung zu der dem Motor zugeführten elektrischen Leistung. Theoretisch entspricht eine PS Kraftleistung 736 zugeführten Watt, folglich ist $\eta_{tot} = \frac{736 \cdot PS}{E_k \cdot I}$, mithin ist die Wattzahl $= \left(\frac{736}{\eta_{tot}}\right) \cdot PS$.

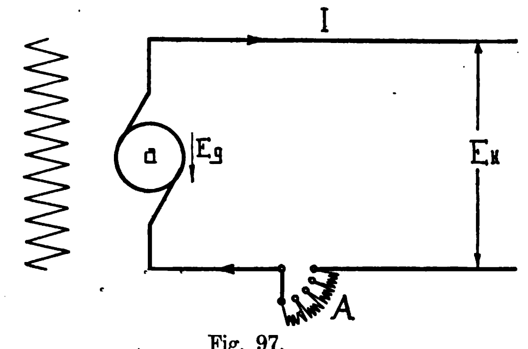


Fig. 97.

Um den Wert von $\frac{736}{\eta_{tot}}$ schneller zu bestimmen, sei folgende Tabelle aufgestellt:

Wirkungsgrad[2]) in %	75	76	77	78	79	80	81	82	83
Wattverbrauch der Elektromotoren pro PS	980	970	955	945	930	920	910	900	885
Wirkungsgrad in %	84	85	86	87	88	89	90	91	92
Wattverbrauch der Elektromotoren pro PS	875	865	855	845	835	825	820	810	800

14. Das Joulesche Gesetz.

Der englische Physiker Joule hat durch Experimente gefunden, daß in einem Widerstand von W Ohm, in welchem ein Strom von I Ampere fließt (oder an dessen Enden eine Spannungsdifferenz E_k Volt herrscht), in der Sekunde folgende Wärmemenge entsteht:

$$K = 0{,}24 \cdot I^2 \cdot W \quad \text{Grammkalorien}$$

$$K = 0{,}24 \cdot \frac{E_k^2}{W} \quad \text{„}$$

$$K = 0{,}24 \cdot E_k \cdot I \quad \text{„}$$

Auf dieser Wärmewirkung des elektrischen Stromes beruhen alle Anwendungen desselben in der Beleuchtungstechnik, sowohl das Licht der Glühlampen, als auch das der elektrischen Bogenlampen, ferner die verschiedenen Methoden, mit elektrischem Strom Körper zu erhitzen oder zu schmelzen, Metalle zu löten und zu schweißen usw.

Die Erwärmung durch den Strom kann aber nicht immer nutzbar gemacht werden, sondern stellt häufig einen Energieverlust dar. So erwärmen sich z. B. die Leitungen, welche den Strom von den Stromerzeugungsstellen nach den Konsumstellen führen.

Bezüglich dieser Leitungserwärmung gilt folgendes:

Wenn ein Draht von der Länge L Meter, dem Querschnitt Q Quadrat-

---

[2]) Der Wirkungsgrad ist selbstverständlich von der Größe des Motors abhängig und beträgt ungefähr:

bei 1 PS 65 %	bei 10 PS 88 %	bei 50 PS 91 %
„ 5 „ 84 %	„ 20 „ 90 %	„ 75 „ 92 %

millimeter und dem spezifischen Widerstand s von I Ampere durchflossen wird, so ist:

$$K = 0{,}24 \cdot s \frac{L}{Q} \cdot I^2 \text{ Grammkalorien.}$$

Ein Teil dieser Wärmemenge wird von dem Draht in die umgebende Luft ausgestrahlt. Die auf diese Weise sekundlich verlorene Wärmemenge ist der Temperaturdifferenz zwischen Draht und Luft, ferner der Oberfläche des Drahtes direkt proportional, außerdem ist dieselbe noch von dem Material des Drahtes und seiner Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Bezeichnet man mit K_1 die ausgestrahlte Wärmemenge, mit T_d die Temperatur des Drahtes und mit T_l die Temperatur der Luft,

so ist bei kreisförmigem Drahtquerschnitt die Oberfläche $\frac{\pi \cdot D^{mm} \cdot L^m}{1000}$ qm

und $$K_1 = p \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000} \cdot (T_d - T_l) \text{ Grammkalorien,}$$

worin p ein vom Material usw. abhängiger konstanter Faktor ist.

Anfangs ist die in dem Draht erzeugte Wärmemenge größer als die ausgestrahlte, infolgedessen steigt die Temperatur des Drahtes. Da aber K_1 mit T_d gleichzeitig zunimmt, so wird bald eine Grenze erreicht, wo sekundlich ebensoviel Wärme (K_1) ausgestrahlt wird, wie der Strom erzeugt (K); alsdann findet keine Anhäufung der Wärme mehr statt, die Temperatur des Drahtes bleibt infolgedessen konstant. Die Gleichgewichtsbedingung lautet also:

$$K_1 = K \text{ oder } p \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000} \cdot (T_d - T_l) = 0{,}24 \cdot s \cdot \frac{L \cdot I^2}{Q}.$$

Da bei kreisförmigem Querschnitt $Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$,

so ist $$p \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000} (T_d - T_l) = 0{,}24 \; s \; \frac{L \cdot I^2 \cdot 4}{\pi \cdot D^2},$$

woraus folgt $$(T_d - T_l) = \left(\frac{0{,}24 \cdot 4 \cdot s \cdot 1000}{\pi^2 \cdot p}\right) \cdot \frac{I^2}{D^3} = C \cdot \frac{I^2}{D^3},$$

d. h. die Temperaturdifferenz zwischen dem Draht und seiner Umgebung ist dem Quadrate der Stromstärke direkt und der dritten Potenz des Drahtdurchmessers umgekehrt proportional, sie ist aber unabhängig von der Länge des Drahtes.

Dies Ergebnis gibt die Begründung für eine in der Praxis oft betonte Regel, daß nämlich die Stromdichte (Amperezahl pro Quadratmillimeter) in dünnen Drähten größer sein darf als in starken. Bezeichnet man die Stromdichte mit γ, so ist

$$\gamma = \frac{I}{Q} = \frac{4 \cdot I}{\pi \cdot D^2},$$

$$I = \frac{\gamma \cdot \pi \cdot D^2}{4}.$$

$$T_d - T_l = C \frac{\gamma^2 \cdot \pi^2 \cdot D^4}{16 \cdot D^3} = C \frac{\gamma^2 \cdot \pi^2 \cdot D}{16},$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{16 \cdot (T_d - T_l)}{\pi^2 \cdot C \cdot D}} = \sqrt{\frac{16 \cdot (T_d - T_l)}{\pi^2 \cdot C}} \cdot \sqrt{\frac{1}{D}}.$$

Wenn nun die zulässige Temperaturerhöhung bei allen Drähten dieselbe

sein soll, so ist der erste Wurzelausdruck eine Konstante, und es wird $\gamma = C' \sqrt{\frac{1}{D}}$. Man sieht, daß γ kleiner wird, wenn D zunimmt.

In den Belastungstabellen der Verbandsvorschriften kommt dies deutlich zum Ausdruck. § 20 besagt, daß isolierte Kupferleitungen und nicht im Erdboden verlegte Kupferkabel höchstens mit den in nachstehender Tabelle verzeichneten Stromstärken dauernd belastet werden sollen.

Querschnitt Q qmm	Durchmesser D mm	Höchstzulässige Stromstärke Amp.	Stromdichte Amp./qmm	$\sqrt{\frac{1}{D}}$	C'
0,75	0,98	9	12	1	12
1	1,13	11	11	0,94	11,7
1,5	1,38	14	9,3	0,85	10,9
2,5	1,8	20	8	0,75	10,7
4	2,26	25	6,3	0,66	9,5
6	2,76	31	5,2	0,60	8,7
10	3,56	43	4,3	0,53	8,2
16	4,52	75	4,7	0,47	10,0
25	5,65	100	4,0	0,42	9,5
35	6,68	125	3,6	0,39	9,2
50	7,98	160	3,2	0,35	9,2
70	9,45	200	2,8	0,33	8,5
95	11	240	2,5	0,30	8,3
120	12,4	280	2,3	0,28	8,2
150	13,8	325	2,15	0,27	8,0
185	15,4	380	2,05	0,25	8,2
240	17,4	450	1,87	0,24	7,8
1000	35,6	1250	1,25	0,17	7,4

Aus vorstehender Tabelle geht hervor, daß C' nicht ganz konstant, sondern von 12 anfangend, mit 7,4 endigend, angenommen worden ist.

15. Die elektrochemischen Grundgesetze.

a) Definitionen der elektrochemischen Grundbegriffe.

Die Elektrochemie [1]), ein besonderer Zweig der physikalischen Chemie, behandelt speziell die Umwandlung von elektrischer Energie in chemische und umgekehrt, also die Erzwingung von Reaktionen durch Elektrizität oder die Gewinnung von elektrischer Arbeit aus der Energie chemischer Reaktionen.

Angesäuertes oder salzhaltiges Wasser, gelöste oder geschmolzene Säuren, Salze oder Alkalien werden, wenn der Strom durch sie hindurchgeht, in ihre Bestandteile zerlegt (Elektrolyse).

Ein Apparat, der zur Ausführung einer Elektrolyse dient, heißt eine Zersetzungszelle. Ist der Apparat dazu bestimmt, die Menge der ausgeschiedenen Zersetzungsprodukte zu messen, so nennt man die Vorrichtung ein Voltameter.

Ein Stoff, welcher sich durch einen hindurchgeführten Strom in seine Bestandteile chemisch zerlegen läßt, heißt ein Elektrolyt.

Die in die Flüssigkeit eintauchenden beiden Enden des Leiterkreises, durch welche der Strom in den Elektrolyt ein- beziehentlich wieder austritt, führen den gemeinsamen Namen Elektroden. Meist werden als Elektroden Metallplatten (Platinplatten) oder Kohleplatten verwendet.

[1]) Dieser Abschnitt ist im wesentlichen nach Rühlmann, Grundzüge der Gleichstromtechnik, bearbeitet.

Die Elektrode, durch welche der positive Strom in die Flüssigkeit eintritt, heißt Anode.

Die Elektrode, durch welche der positive Strom aus der Flüssigkeit wieder austritt, heißt Kathode.

Die Bestandteile, in welche der einer Zersetzung unterworfene Körper durch die Elektrolyse zerfällt, nennt man die Ionen. Der Bestandteil, der sich an der positiven Elektrode, also an der Anode, ausscheidet, führt den Namen Anion, das an der negativen Elektrode, an der Kathode, auftretende Ion heißt Kation.

Die Leitung der Elektrizität in einem Elektrolyt erfolgt durch die Bewegung wägbarer Teilchen, der Ionen, an welchen freie Elektrizitätsmengen haften. Diese Elektrizitätsmengen werden der einen Elektrode entnommen und an die andere abgegeben.

Die Ionen bewegen sich durch den Elektrolyt hindurch, bis sie an den Elektroden erscheinen und dort merklich werden; die Bewegung wird die Wanderung der Ionen genannt. Dabei bewegen sich die Ionen mit verschiedener, aber bestimmter Ionengeschwindigkeit, die von der Natur des Ions und von der Konzentration des Elektrolyts abhängig ist. Erst bei starker Verdünnung sind die Ionengeschwindigkeiten von der Konzentration unabhängig.

b) Das Faradaysche Gesetz und das elektrochemische Äquivalent.

Für die elektrolytischen Vorgänge gilt das Faradaysche Gesetz der unveränderlichen elektrolytischen Wirkung. Dasselbe lautet: Die durch einen Strom zersetzten Mengen sind einander chemisch äquivalent, und der Stromstärke, sowie der Zeit, während welcher der Strom gewirkt hat, proportional.

An den Elektroden werden somit chemisch äquivalente Mengen der Ionen ausgeschieden, und wenn ein und derselbe Strom durch mehrere Zersetzungszellen hintereinander hindurchgeführt wird, sind auch die in den verschiedenen Zellen zersetzten Mengen des Elektrolyts einander chemisch äquivalent.

An der Kathode scheiden sich der Wasserstoff, oder die Metalle, oder dem Metall ähnliche Radikale aus, an der Anode der Rest des zusammengesetzten, leitenden Körpers (der sogenannte Säurerest). In vielen Fällen treten jedoch an den Elektroden sekundäre chemische Wirkungen auf.

Das Faradaysche Gesetz wird durch die Gleichung dargestellt:

$$M = \frac{a \cdot h}{k} \cdot i \cdot t = \frac{a}{k} \cdot 0{,}00001044 \cdot i \cdot t = A \cdot i \cdot t.$$

Hierin ist M die Menge des ausgeschiedenen Ions in Gramm, a das auf Wasserstoff als Einheit bezogene Atomgewicht, k die Wertigkeit des Ions im Elektrolyt, i die Stromstärke, t die Anzahl Sekunden, während welcher die Zersetzung durch den Strom stattgefunden hat.

Der Zahlenfaktor $h = 0{,}00001044$ entsteht auf folgende Weise: Die Elektrizitätsmenge von 1 Coulomb scheidet aus Silbernitrat ($AgNO_3$) 0,0011183 g Silber aus. Das Atomgewicht des Silbers verhält sich zu dem des Wasserstoffs wie 107,92 zu 1,008. Demnach ist $h = 0{,}0011183 : 107{,}92 = 0{,}00001044$. Das Produkt $\frac{a \cdot h}{k} = A$ nennt man das elektrochemische Äquivalent des Körpers. Das elektrochemische Äquivalent kann auch definiert werden als die Menge, welche ein Strom von 1 Ampere in 1 Sekunde ausscheidet ($M = A \times 1 \times 1$).

Da die Elektrizitätsmenge, welche durch jeden Querschnitt eines Leiters in dem Zeitraum einer Sekunde fließt, wenn die Stromstärke gleich 1 Ampere ist, gleich 1 Coulomb ist, so kann man auch sagen: Das elektrochemische Äquivalent ist die Menge eines Stoffes, welche durch ein Coulomb ausgeschieden wird.

Die nachstehende Tabelle gibt die in Betracht kommenden Zahlen für die wichtigsten Stoffe:

Name des Körpers	Atomgewicht	Wertigkeit	Äquivalent	Elektrochemisches Äquivalent in g	Ausscheidung pro Stundenampere in g
		Elektropositive Körper (Kationen).			
Aluminium	27,11	3	9,04	0,0000935	0,337
Blei	206,39	2	103,20	0,00122078	3,859
Eisen	56,02	2	28,01	0,000290	1,045
Gold	197,2	3	65,7	0,000681	2,452
Kalium	39,12	1	39,12	0,000405	1,459
Kupfer	63,60	2	31,80	0,0003289	1,184
Magnesium	24,36	2	12,18	0,000126	0,454
Natrium	23,05	1	23,05	0,000239	0,860
Nickel	58,9	2	29,45	0,000304	1,095
Platin	194,8	4	48,7	0,000504	1,814
Quecksilber	200,3	2	100,01	0,001037	3,733
Silber	107,92	1	107,92	0,0011183	4,025
Wasserstoff	1,008	1	1	0,00001044	0,03758
Zink	65,41	2	32,70	0,000339	1,220
Zinn	119,10	4	29,6	0,000307	1,105
		Elektronegative Körper (Anionen).			
Brom	79,93	1	79,93	0,000829	2,984
Chlor	35,46	1	35,46	0,000367	1,322
Jod	126,86	1	126,86	0,001314	4,730
Sauerstoff	16	2	8	0,0000829	0,298
Stickstoff	14,04	3	4,68	0,00004847	0,1745

Solche Körper, welche mit verschiedener Wertigkeit in verschiedenen Verbindungsgruppen auftreten, sind selbstverständlich mit derjenigen Wertigkeit einzusetzen, welche das Ion in der der Elektrolyse unterworfenen Verbindung besitzt.

Das Faradaysche Gesetz hat sich sowohl hinsichtlich der Proportionalität zwischen zersetzter Stoffmenge und hindurchgegangener Elektrizitätsmenge, als auch hinsichtlich der chemischen Äquivalenz der ausgeschiedenen Mengen der Ionen als absolut genau erwiesen.

Um gerade ein in Gramm ausgedrücktes Äquivalent einer chemischen Verbindung zu zersetzen, ist eine Elektrizitätsmenge von 96540 Coulomb erforderlich. Mit einem Grammäquivalent eines Elektrolyten wandert eine Elektrizitätsmenge von 96500 Coulomb. Denn 1 Coulomb (1 Ampere Stromstärke in 1 Sekunde) scheidet 0,001183 g Silber aus; 1 Grammäquivalent Silbernitrat wiegt 169,98 g; bei der Zersetzung dieser Gewichtsmenge Silbernitrat wird 1 Grammäquivalent, das sind 107,92 g, Silber ausgeschieden; somit ist $107{,}92 : 0{,}0011183 = 96500$ Coulomb die elektrochemische Einheit der Stromstärke.

Die Tatsache, daß ein Strom von bestimmter Stärke in gleicher Zeit immer eine ihrer Größe nach ganz genau bekannte chemische Wirkung hervorbringt, wird häufig benutzt, um in einfacher Weise Stromstärken auf chemischem Wege zu messen; die hierzu bestimmten Apparate sind

die bereits erwähnten Voltametern (näheres darüber siehe Heft 3) und die elektrolytischen Elektrizitätszähler (näheres darüber siehe Heft 5).

c) Galvanische Polarisation.

Wenn der elektrische Strom durch eine chemische Verbindung hindurchgeht und dieselbe in ihre Bestandteile zersetzt, so leistet er dabei insofern eine Arbeit, als er die Ionen trennt, elektrisch ladet und in der widerstehenden Flüssigkeit fortbewegt. Das Streben der durch die Elektrolyse ausgeschiedenen, elektrisch neutralen Bestandteile, aufs neue in den Zustand elektrisch geladener Ionen zurückzukehren, macht sich geltend als eine an den Elektroden der Zersetzungszelle wirksame elektromotorische Gegenkraft, welche man galvanische Polarisation nennt. Diese entstehende elektromotorische Kraft wirkt also der elektromotorischen Kraft der Elektrizitätsquelle, durch welche der elektrolytische Vorgang veranlaßt wird, entgegen.

Schaltet man die Elektrizitätsquelle aus und verbindet die Elektroden der Zersetzungszelle durch einen Leiter, so fließt in diesem und in der Zelle ein Strom, dessen Richtung derjenigen des die vorhergehende Elektrolyse bewerkstelligenden Stromes entgegengesetzt ist, dessen Stärke jedoch rasch abnimmt. Man nennt diesen Strom Polarisationsstrom.

In einem Stromkreise, in dem eine Zersetzungszelle vorhanden ist, nimmt das Ohmsche Gesetz die Gestalt an:

$$i = \frac{E - e_g}{W},$$

wenn i die Stromstärke, W der Gesamtwiderstand des Stromkreises, E die EMK der Elektrizitätsquelle und e_g die EMK der Polarisation ist. Multipliziert man die Gleichung mit i und ordnet sie etwas anders, so erhält man:

$$E \cdot i = i^2 \cdot W + e_g \cdot i.$$

Hierin ist $E \cdot i$ die überhaupt aufgewendete elektrische Energie, $i^2 \cdot W$ derjenige Teil derselben, welcher zur Erwärmung nach dem Jouleschen Gesetz verwendet wird; $e_g i$ ist der durch die chemischen Vorgänge in der Zelle verbrauchte Anteil. Es ist $e_g i$ die Verbindungswärme der Elektrolytmenge, welche in einer Sekunde zersetzt worden ist.

Die Größe e_g ist das Produkt aus dem elektrochemischen Äquivalent des Elektrolyten und der Verbindungswärme der Gewichtseinheit, und wird die Wärmetönung der zerlegten Verbindung genannt (Thomson-Helmholtzsche Gesetz).

Nach diesem Gesetz, welches jedoch nur in sehr roher Annäherung gültig ist, müßte es, um die Zersetzung einer Verbindung einzuleiten, ein gewisses Minimum der elektromotorischen Kraft geben und zwar $E = e_g$. In Wirklichkeit kann man aber mit einer beliebig niedrigen elektromotorischen Kraft die Elektrolyse einleiten. Eine merkliche, dauernde Zersetzung des Elektrolyten durch den Strom tritt jedoch erst dann ein, wenn das aus der Wärmetönung des Elektrolyten berechnete Minimum der elektromotorischen Kraft, der Zersetzungswert der Verbindung, überschritten worden ist. Die Elektrolyse beginnt zwar schon bei niedrigeren elektromotorischen Kräften, die Stromstärke wird aber durch die entgegenwirkende Polarisation sehr bald fast auf Null zurückgebracht. Da jedoch durch Diffusion immer die Konzentration der an den Elektroden ausgeschiedenen

Stoffe vermindert wird, kann ein ganz schwacher Strom dauernd zustande kommen.

Le Blanc fand als Zersetzungswerte von Lösungen, welche im Liter ein Verbindungsgewicht der Metallsalze enthielten, für

Zinksulfat . .	2,35 Volt	Kadmiumsulfat . .	2,03 Volt
Nickelsulfat . .	2,09 „	Kadmiumchlorür .	1,88 „
Nickelchlorür .	1,85 „	Kobaltsulfat . .	1,92 „
Silbernitrat . .	0,70 „	Kobaltchlorür . .	1,78 „

Aus der Verschiedenheit der Zersetzungswerte von Metallsalzlösungen erklärt sich die Möglichkeit, aus Lösungen, welche verschiedene Metalle gleichzeitig enthalten, die einzelnen Metalle frei von anderen Beimengungen nacheinander abzuscheiden.

Verwendet man ein galvanisches Element als Stromquelle, so fließt der Strom nicht nur durch den äußeren Stromkreis, sondern auch durch das Element selbst hindurch und wirkt auf dieses Element wie auf eine Zersetzungszelle. Infolgedessen scheidet sich an der Eintrittsstelle des Stromes in das Element, d. h. an dem negativen Pole, das Anion, an der Austrittsstelle des Stromes, d. h. dem positiven Pole des Elementes, das Kation aus. Da man nun in fast allen galvanischen Elementen in Wasser gelöste Säuren, Alkalien oder Salze verwendet, so handelt es sich zumeist um eine Wasserzersetzung, bei der an dem Zink Sauerstoff und an dem positiven Pole (Kupfer, Platin, Kohle) Wasserstoff ausgeschieden wird. Daher entsteht in den meisten galvanischen Elementen alsbald, nachdem sie in Tätigkeit gesetzt worden sind, durch die ausgeschiedenen Ionen eine elektromotorische Gegenkraft, eine Polarisation, durch welche die wirksame elektromotorische Kraft und damit auch die Stromstärke vermindert wird. Besonders ist es der an dem positiven Pole sich ausscheidende Wasserstoff, von dem der Hauptteil der polarisierenden Wirkung herrührt (über die depolarisierenden Mittel siehe Seite 44).

16. Die Sekundärelemente oder Akkumulatoren.

Auf Seite 86 wurde bereits die Entstehung des Polarisationsstromes, eines sekundären Stromes, erwähnt, welchen eine Zersetzungszelle liefern kann, nachdem man vorher einen Strom durch sie hindurch geleitet hatte. Ganz besonders eignen sich Bleiplatten (Pb) in verdünnter Schwefelsäure (H_2SO_4) zur Erzeugung sekundärer Ströme.

Sendet man Strom durch eine solche Zelle, so findet eine Zersetzung der Schwefelsäure statt, der Wasserstoff wandert zur negativen, der Schwefelsäurerest zur positiven Elektrode. An der letzteren bildet der Schwefelsäurerest mit dem Blei zunächst Bleisulfat nach der Gleichung

$$\text{Schwefelsäurerest} + \text{Blei} = \text{Bleisulfat}$$
$$SO_4 + Pb = PbSO_4.$$

Dieses Bleisulfat wird durch weitere zuströmende SO_4-Ionen in Bleibisulfat umgewandelt:

$$SO_4 + PbSO_4 = Pb(SO_4)_2.$$

Gleichzeitig werden aber auch, da die Bildung des Bleibisulfates nicht quantitativ vor sich geht, SO_4-Ionen in Schwefelsäure (H_2SO_4) übergeführt, wobei Sauerstoff gasförmig abgeschieden wird. Nach Erbs zerfällt Bleibisulfat mit Wasser in Bleisuperoxyd und Schwefelsäure nach folgender Gleichung:

$$\text{Bleibisulfat} + \text{Wasser} = \text{Bleisuperoxyd} + \text{Schwefelsäure}$$
$$Pb(SO_4)_2 + 2H_2O = PbO_2 + 2H_2SO_4.$$

Unterbricht man die Stromzuleitung (Fig. 98), so hat man an der positiven Elektrode Bleisuperoxyd, an der negativen Elektrode den durch Wasserstoff reduzierten Bleischwamm.

Verbindet man nun die positive Elektrode mit der negativen durch einen äußeren Widerstand (Fig. 99), so fließt durch diesen ein Strom von der positiven Bleisuperoxydelektrode zu der negativen Bleielektrode und von dieser durch den Elektrolyt zurück zu der positiven Elektrode. Die Bleischwammplatte (von grauer Farbe) wird also während der Entladung zur positiven, die Bleisuperoxydplatte (von schokoladenbrauner Farbe) zur negativen Elektrode, infolgedessen wandert durch Zerlegung der Schwefelsäure das Anion SO_4 zur positiven Bleielektrode und bildet Bleisulfat, während der an der negativen Elektrode abgeschiedene Wasserstoff das Bleisuperoxyd zu Bleioxyd bzw. metallischem Blei reduziert. Diese Vorgänge erfolgen im Sinne nachstehender Gleichungen:

an der negativen Elektrode: $Pb + SO_4 = PbSO_4$.

an der positiven Elektrode: $PbO_2 + 2H = PbO + H_2O$.

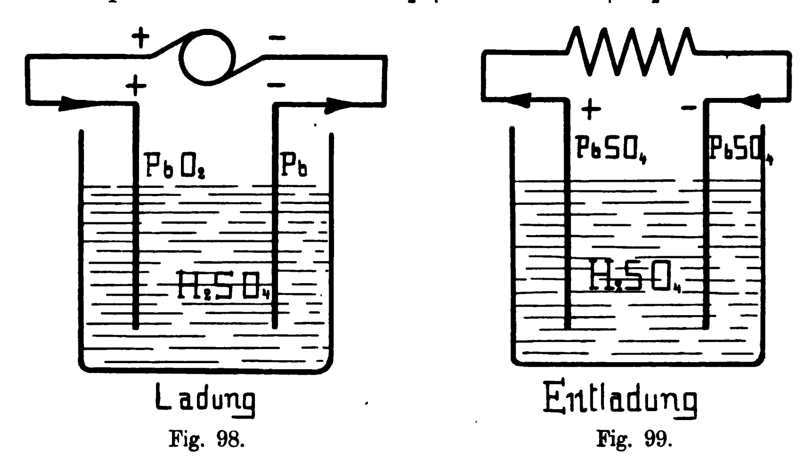


Fig. 98. Fig. 99.

Dieses an der positiven Elektrode gebildete Bleioxyd bildet mit Schwefelsäure ebenfalls Bleisulfat, $PbO + H_2SO_4 = PbSO_4 + H_2O$. Wenn alles Bleisuperoxyd reduziert ist, hört die Stromentwicklung auf, der Akkumulator ist erschöpft und muß nun wieder geladen werden, wobei die oben angegebenen Vorgänge sich wiederholen. An der jetzt wieder zur negativen Elektrode gewordenen Bleischwammelektrode wird durch den Wasserstoff das gebildete Bleisulfat zu Bleischwamm und Schwefelsäure reduziert:

$$PbSO_4 + 2H = Pb + H_2SO_4,$$

während an der positiven Elektrode wieder die Bildung von Bleisuperoxyd erfolgt.

Bei der Entladung des Akkumulators wird also Schwefelsäure aus dem Elektrolyt gebunden (Bildung von Bleisulfat an der positiven und negativen Elektrode), bei der Ladung dagegen frei. Der Elektrolyt ist also bei der Ladung konzentrierter als bei der Entladung, so daß man aus dem spezifischen Gewicht des Elektrolyten (Messung mit dem Aräometer) Schlüsse auf den Ladezustand des Akkumulators ziehen kann. Die Ladung ist beendigt, wenn das spezifische Gewicht des Elektrolyten sich nicht mehr erhöht. Außerdem zeigt sich das Ende der Ladung durch reichliches Entweichen von Sauerstoff an der positiven Polplatte an, daher rührend,

daß der Schwefelsäurerest (SO_4) nicht mehr Material zur Bildung von Bleibisulfat vorfindet und deshalb unter Wasserzersetzung Schwefelsäure bildet, während Sauerstoff gasförmig entweicht[1]).

Die elektromotorische Kraft eines Akkumulators ist von der Säuredichte abhängig und beträgt

$$E = [1{,}85 + 0{,}917 \cdot (s - 1)] \text{ Volt},$$

wo s das spezifische Gewicht der Säure[2]) ist.

Das ergibt für s = 1,05 1,1 1,2 1,3
eine EMK von E = 1,895 1,942 2,033 2,125 Volt.

Ferner ändert sich die elektromotorische Kraft mit der Temperatur; der Temperaturkoeffizient ist seinerseits wieder von der Konzentration des Elektrolyten abhängig, bei schwacher Konzentration ist er negativ, bei höherer Konzentration positiv. Entsprechend der Veränderung der Säure-

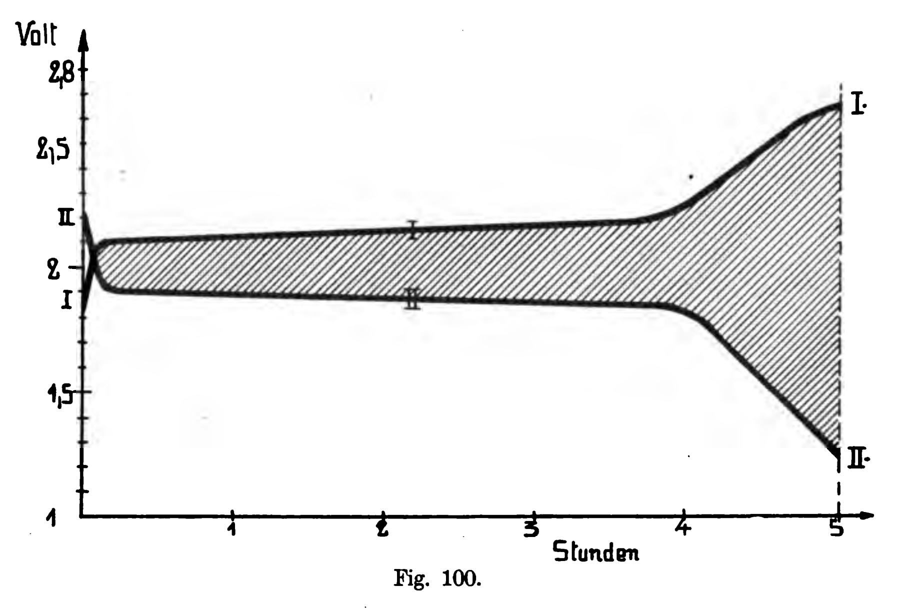


Fig. 100.

dichte bei der Ladung und Entladung ändert sich auch die elektromotorische Kraft des Akkumulators. In Fig. 100 ist die Ladekurve (I) und die Entladekurve (II) dargestellt, und zwar für Ladung und Entladung mit ein und derselben Stromstärke I. Bei Beginn der Ladung steigt die elektromotorische Kraft schnell auf etwa 2,1 Volt (entsprechend der anfangs geringen Säurekonzentration). Die nun folgende langsame Steigerung bis 2,2 Volt rührt von dem Wachsen der Konzentration her. Schließlich ist das $PbSO_4$ verbraucht, und es beginnt Entwicklung von H_2 und O (Kochen des Akkumulators). Hierzu ist eine Spannung von mindestens 2,58 Volt nötig. Man ladet den Akkumulator bis maximal 2,75 Volt. Bei der Entladung sinkt die elektromotorische Kraft schnell auf 1,9 Volt,

[1]) Die an den chemischen Vorgängen bei der Ladung und Entladung teilnehmenden Teile der Elektroden nennt man die aktive Masse. Die Umwandlung der Bleiplatten in aktive Masse, das Formieren der Platten, kann nur bis zu einer gewissen Grenze fortgesetzt werden, da sonst die Platten die nötige Festigkeit verlieren würden.

[2]) Gewöhnlich hat die Schwefelsäure, welche zum Füllen der Akkumulatoren verwendet wird, ein spezifisches Gewicht von 1,15 bis 1,22.



dann langsam wegen Verringerung der Säurekonzentration und später schnell bis auf Null. Verloren geht eine Arbeit, welche der zwischen den beiden Kurven liegenden schraffierten Fläche proportional ist (die Fläche gibt Voltstunden an, multipliziert mit dem konstanten I ergibt sie Wattstunden). Es geht also um so mehr Arbeit verloren, je länger man den Akkumulator ladet (kochen läßt) und je weiter man entladet. Man bricht also die Ladung zweckmäßig gleich nach dem starken Spannungsanstieg ab und entladet nicht weiter als 1,85 bis 1,83 Volt.

Die Klemmenspannung E_k des Akkumulators ist

bei der Ladung $E_k = E + I \cdot w_i$,

" " Entladung $E_k = E - I \cdot w_i$.

Der innere Widerstand w_i ist bei kleinen Akkumulatorentypen einige hundertstel Ohm, bei großen fast Null, so daß sich in Wirklichkeit die E_k wenig von E unterscheidet. Der innere Widerstand wächst mit zunehmender Entladung, er ist außerdem wesentlich von der Stromdichte abhängig.

Unter Kapazität eines Akkumulators versteht man diejenige Elektrizitätsmenge, welche der vorschriftsmäßig behandelte Akkumulator abgeben kann. Wird ein Akkumulator mit der konstanten Stromstärke I entladen und dauert die Entladung bis etwa 1,83 Volt Klemmenspannung T Stunden, so beträgt die Kapazität bei T-stündiger Entladung $I \cdot T$ Amperestunden. Die Kapazität ist wesentlich von der Stromdichte (Entladestromstärke) abhängig, je geringer die Stromdichte[1]), desto größer ist die Kapazität. Ferner wird die Größe der Kapazität noch beeinflußt durch die Konzentration der Säure, durch die Temperatur und andere Umstände mehr.

Nennt man die einem Element während der Ladung zugeführte Elektrizitätsmenge, ausgedrückt in Amperestunden, Q_1 und die während der Entladung von den Zellen abgegebene Elektrizitätsmenge Q_2, so ist

$$\eta \text{ (bezogen auf Amperestunden)} = \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Praktisch interessiert dieser Wirkungsgrad weniger als der totale Wirkungsgrad η_{tot}[2]). Darunter versteht man den Quotienten, den man

[1]) Die größte zulässige Stromdichte hängt von der wirksamen Oberfläche, von der Dicke der aktiven Schicht und von der Porosität der Platten ab. Kennt man die maximale Ladestromstärke nicht, so bestimme man die projizierte Oberfläche der positiven Platten; ist die Länge einer Platte a dcm und die Breite b dcm, so ist die Oberfläche einer Platte $2 \cdot a \cdot b$ dcm². Sind x positive Platten in einem Elemente, so ist die Oberfläche $2 \cdot x \cdot a \cdot b$ dcm². Pro dcm² darf man 0,6 bis 0,7 Ampere rechnen.

[2]) Über die Wirkungsgrade der Akkumulatoren gibt folgende Tabelle Aufschluß, welche C. Heim-Hannover veröffentlicht hat.

Ladet man bis etwa 2,6 Volt pro Zelle und entladet bis zu 1,83 Volt Klemmenspannung, so zwar, daß die Entladung spätestens innerhalb 24 Stunden nach beendigter Ladung vorgenommen wird, so erhält man je nach der Zeitdauer der Entladung, oder was dasselbe sagt, je nach der Stromdichte, mit der die Entladung geschieht, bei guten Akkumulatoren folgende Wirkungsgrade:

Dauer der Entladung		3 Stunden	5 Stunden	7 Stunden
Stromdichte bei Entladung		1,00—1,25	0,70—0,85	0,50—0,65
Wirkungsgrad bezogen auf	Amperestunden	91—90 %	93—92 %	95—93 %
	Wattstunden	77—75 %	82—79 %	84—82 %

Dabei ist vorausgesetzt, daß bei der Ladung sowohl wie bei der Entladung die Stromstärke von Anfang bis zu Ende gleichmäßig ist. Im praktischen Betriebe werden infolge des Zusammenwirkens verschiedener Umstände die angeführten günstigen Zahlen im allgemeinen nicht erreicht. Man kann bei Kostenberechnungen das auf die elektrische Arbeitsleistung (Wattstunden) bezügliche Güteverhältnis zu nicht mehr als 70 % bei dreistündiger, und etwa 75 % bei fünfstündiger Entladung annehmen.

erhält, wenn man die vom Akkumulator während der Entladung abgegebene Energie (in Wattstunden) durch die dem Akkumulator bei der vorhergegangenen Ladung zugeführte Energie (in Wattstunden) dividiert.

Da die maximale Ladespannung 2,75 Volt pro Element beträgt, während man bis 1,85—1,83 Volt höchstens entladen darf, so ergibt sich ohne weiteres die Elementenzahl, welche man zur Erzielung einer bestimmten Betriebsspannung E mindestens braucht $\left(\text{nämlich } \frac{E}{1,83} \text{ Elemente}\right)$, ferner die Größe der Ladespannung, welche zur Verfügung stehen muß $\left(\text{nämlich } 2,75 \cdot \frac{E}{1,83} = 1,5 \cdot E \text{ Volt}\right)$.

17. Das Solenoid und das Gesetz von Biot und Savart.

Unter einem Solenoid versteht man eine aus vielen Windungen bestehende Spirale aus Leitungsdraht, durch welche ein Strom hindurchfließt. Das Gesetz von Biot und Savart gestattet, die Wirkungen einer solchen stromdurchflossenen Spule zu berechnen.

In dem Leiter AB (Fig. 101), welcher in der Papierebene liegt, fließt ein Strom von I Ampere. Im Abstande r vom Leiterstück ab = L cm befindet sich eine nordmagnetische Menge M. Das Leiterstück L wird nun auf M eine Kraft T ausüben, welche senkrecht zur Papierebene gerichtet ist. Nach der Rechtehandregel wird bei der angegebenen Stromrichtung (von A nach B) M in die Papierebene hineingedrängt.

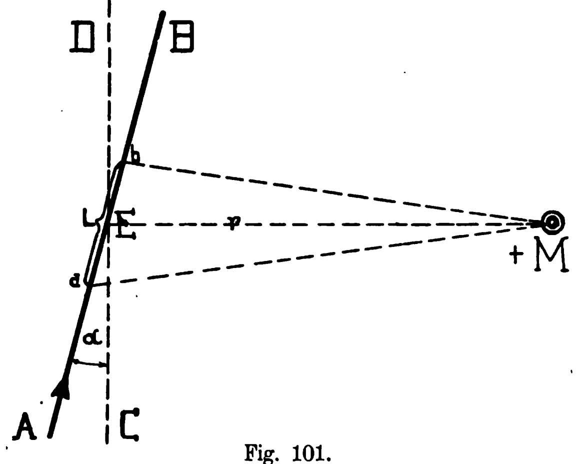


Fig. 101.

Da ab = L nicht senkrecht zu $\overline{EM}$ steht, sondern um den Winkel α geneigt, so kommt für die Kraftwirkung auf M nur die Projektion von L auf $\overline{CD}$ (welche senkrecht auf $\overline{EM}$ steht), also $L \cdot \cos\alpha$, in Betracht. Nach den Untersuchungen von Biot und Savart ist

$$P = \frac{\left(\frac{i}{10} \cdot L \cdot \cos\alpha\right) \cdot M}{r^2} \text{ Dynen.}$$

Ist $\alpha = 0$, so erhält man $P_{max} = \frac{\frac{i}{10} \cdot L \cdot M}{r^2}$ Dynen [1]).

---

[1]) $\frac{M}{r_2}$ ist nichts anderes, als die magnetische Feldstärke, die von dem Magnetpol M an der Stelle, wo das Leiterstück sich befindet, erzeugt wird. Bezeichnet man diese Feld-

In Fig. 102 ist der stromdurchflossene Leiter kreisförmig gezeichnet; der Kreis hat den Durchmesser D cm, die nordmagnetische Menge M ist R cm von der Windungsfläche entfernt und hat eine solche Lage, daß die Verbindungslinie zwischen M und dem Kreismittelpunkt auf der Kreisfläche senkrecht steht. Zerlegt man die Windung in x gleiche Teile ab = l cm, so ist $l = \frac{D\pi}{x}$ cm.

Die Kraft P_1, welche von l auf + M ausgeübt wird, ist, weil r auf l senkrecht steht,

$$P_1 = \frac{\frac{i}{10} \cdot l \cdot M}{r^2} \text{ Dynen.}$$

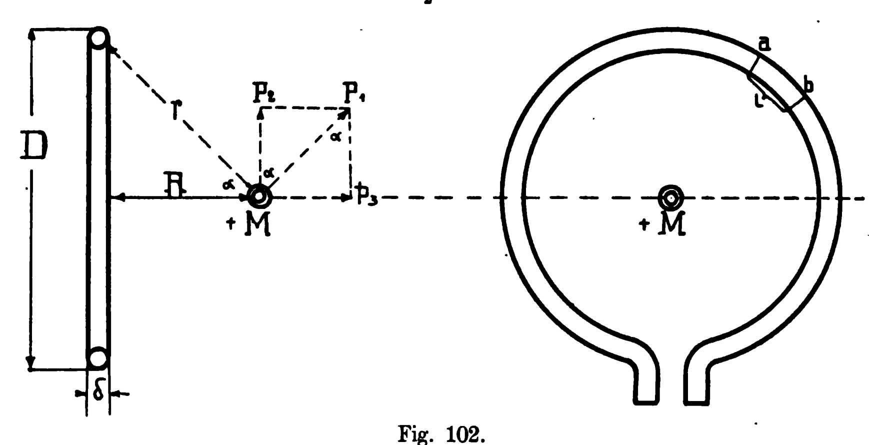


Fig. 102.

Diese Kraft P_1 wirkt senkrecht zu r und kann in zwei Komponenten zerlegt werden und zwar in

$$P_2 \text{ (senkrecht auf R)} = P_1 \cdot \cos\alpha \text{ und}$$

$$P_3 \text{ (in Richtung von R)} = P_1 \cdot \sin\alpha = P_1 \cdot \frac{D}{2 \cdot r}.$$

---

stärke mit H_1, so kann man auch sagen, das Leiterstück wird in dem Feld von der Stärke H_1 mit der Kraft

$$P = \frac{i}{10} \cdot L \cdot H_1 \text{ Dynen}$$

abgelenkt. Diese Gleichung hat für gerade Stromleiter von der Länge L Gültigkeit, wenn an allen Stellen des Leiters dieselbe Feldstärke H_1 vom Magnetpol M erzeugt wird.

Ein solches in der Leiterrichtung homogenes Magnetfeld ist z. B. in dem Luftraum zwischen den Polen und dem Anker eines Elektromotors vorhanden. In diesem Falle kann die Gleichung zur Bestimmung der Umfangskraft am Anker benutzt werden.

Ist die Feldstärke H_1 und befinden sich im Bereiche des Magnetfeldes, also unter den Polflächen, z Umfangsdrähte von je L cm Länge, so wird

$$P = \frac{i}{10} \cdot L \cdot z \cdot H_1 \text{ Dynen} = \frac{i}{10} \cdot \frac{L \cdot z \cdot H_1}{981000} \text{ kg.}$$

Hat der Anker D cm Durchmesser, so ist das Drehmoment $M_d = P \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{D}{100}$ mkg. Läuft der Anker mit n Umdrehungen pro Minute, so ist die Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$. Der Anker leistet dann $N = M_d \cdot \omega$ mkg/sek. $= \frac{M_d \cdot \omega}{75}$ PS,

also $N = \frac{i}{10} \cdot \frac{L \cdot z \cdot H_1}{931000} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{D}{100} \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot \frac{1}{75} = 7{,}1\ (L \cdot z \cdot D) \cdot n \cdot i \cdot H_1 \cdot 10^{-13}$ PS.

Da nun x im Kreise um M angeordnete Kräfte P_1 auf M wirken, so heben sich die Kräfte P_2 sämtlich gegenseitig auf, weil P_2 bei je zwei diametral gegenüberliegenden Teilchen l die entgegengesetzte Richtung hat.

Es bleiben also nur x mal P_3 Kräfte in Richtung von R, also

$$P = x \cdot P_3 = x \cdot P_1 \cdot \frac{D}{2r} = x \cdot \frac{\frac{i}{10} \cdot l \cdot M}{r_2} \cdot \frac{D}{2r}.$$

Weil $x \cdot l = D\pi$ ist, wird

$$P = \frac{2\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \frac{i}{10} \cdot M}{r^3}.$$

Liegt die magnetische Menge M im Mittelpunkt der Windung, ist also (für Fig. 102) $R = 0$, dann ist $r = \frac{D}{2}$, und die allgemeine Formel geht über in

$$P' = \frac{2\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{i}{10} \cdot M}{\left(\frac{D}{2}\right)^3} = \frac{2\pi \cdot \frac{i}{10} M}{\frac{D}{2}} = \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot i\, M}{D}\ ^{1)}.$$

Wenn D gegenüber R sehr klein ist, so kann man $r = R$ setzen, und die allgemeine Formel geht über in

$$P'' = \frac{2\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \frac{i}{10} \cdot M}{R^3}.$$

Da $\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = Q =$ Fläche der Windung ist, so wird $P'' = \frac{2M}{R^3} \cdot Q \cdot \frac{i}{10}$.

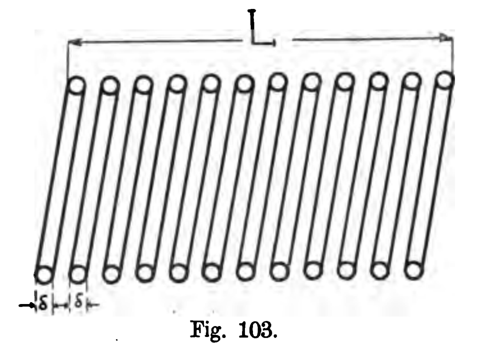


Fig. 103.

Vergleicht man den letzten Ausdruck mit der Gaußschen Formel auf Seite 22, so erkennt man, daß die magnetischen Wirkungen sowohl bei einer stromdurchflossenen Windung, als auch bei einem Magnetstab mit der dritten Potenz der Entfernung abnimmt, und daß das magnetische Moment der Stromschleife gleich $Q \cdot \frac{i}{10}$ ist. Die magnetische Menge der Stromschleife ist gleich $\frac{\frac{i}{10}}{\delta}$, wenn man mit δ die Dicke der Stromschleife bezeichnet.

Nach Seite 23 ist die Kraftlinienzahl eines Magneten und mithin auch einer Stromschleife gleich 4π mal magnetische Menge, also

$$Z = \frac{4\pi \cdot Q \cdot \frac{i}{10}}{\delta} = \frac{4\pi}{10} \cdot i \cdot \frac{Q}{\delta}.$$

Reiht man jetzt m solche Windungen zu einem Solenoid von der Länge L aneinander (Fig. 103), so kann man sich dieses Solenoid durch

---

1) Diese Formel findet in der Theorie der Tangentenbussole Anwendung.

eine einzige Windung von der Breite $m\delta = L$ ersetzt denken, durch welche ein Strom von $(m \cdot i)$ Ampere hindurchfließt. Es wird also

$$Z = \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot mi \cdot Q}{L}.$$

Das Produkt $m \cdot i$ heißt die Amperewindungszahl des Solenoides.

Die im Innern der Spule herrschende Feldstärke

$$H = \frac{Z}{Q} = \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot mi}{L} = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{mi}{L}.$$

$\frac{mi}{L}$ bedeutet in diesem Ausdruck die Amperewindungszahl pro Zentimeter Spulenlänge; man erhält also den wichtigen Satz, daß die magnetische Feldstärke im Innern eines (mit Luft erfüllten) Solenoides der pro Zentimeter aufgewendeten Amperewindungszahl direkt proportional ist.

18. Elektromagnetisches Verhalten des Eisens.

Schon oben Seite 12 wurde ein Unterschied gemacht zwischen dem Kraftlinienfelde in Luft und dem Kraftlinienfelde im Eisen. Die Feldstärke (Kraftlinienzahl pro qcm) in Luft wurde mit H, die Feldstärke im Eisen mit B[1]) bezeichnet.

Bringt man in einen magnetischen Luftraum, welcher die Feldstärke H hat, einen Eisenstab, so setzt sich die Kraftlinienzahl B in diesem Eisenstab aus zwei Teilen zusammen, nämlich aus der Kraftlinienzahl H, welche von dem magnetischen Felde herrühren und der Anzahl X der Kraftlinien, welche in dem Eisen verlaufen und durch das Einbringen des Eisenkörpers in das Feld (infolge der besseren magnetischen Leitfähigkeit des Eisens) neu entstanden sind.

X ist gleich $4\pi \cdot H \cdot \varkappa$[2]), B setzt man gleich $\mu \cdot H$, ferner ist B nach dem eben Gesagten $B = H + X = H + 4\pi H\varkappa$.

μ nennt man die magnetische Permeabilität oder die magnetische Leitfähigkeit, μ sagt aus, um wieviel mal mehr Kraftlinien in einem Magnetfeld entstehen, wenn statt Luft Eisen in das Feld gebracht wird.

$\frac{1}{\mu}$ nennt man spezifischen magnetischen Widerstand.

$\varkappa$ nennt man Suszeptibilität (magnetische Aufnahmefähigkeit) oder Magnetisierungskoeffizient.

Dividiert man die Gleichung $B = H + 4\pi H\varkappa$ durch H und setzt $B : H = \mu$, so erhält man

$$B : H = \mu = 1 + 4\pi\varkappa.$$

Versuche haben gezeigt, daß $\varkappa$ und somit auch die von ihr abhängige Zahl μ keine Konstanten sind. Bei schwachen Sättigungen, welche jedoch praktisch gar nicht in Betracht kommen, wächst mit zunehmender Stärke von H auch $\varkappa$ und μ, beide erreichen schließlich einen Höchstwert und nehmen hierauf wieder ab, so daß der spezifische Magnetismus $4\pi H\varkappa$

[1]) B nennt man auch vielfach den Sättigungsgrad oder kurzweg die Sättigung des Eisens.

[2]) Den Wert $H \cdot \varkappa$ nennt man den spezifischen Magnetismus oder die Intensität der Magnetisierung.

eine Konstante, die Größe $\varkappa$ also H umgekehrt proportional wird. Dieser Zustand entspricht der magnetischen Sättigung des Eisens. Für praktische Zwecke kommen nur diejenigen Werte in Betracht, bei denen mit zunehmender Magnetisierung μ abnimmt[1]).

μ hängt außerdem noch von der Beschaffenheit des Materiales ab. Am kleinsten ist es bei Gußeisen, dann kommt Stahl, Schmiedeeisen und

Fig. 104.

Dynamostahl. Fig. 104 zeigt die Veränderung von μ in Abhängigkeit von H, Fig. 105 die Abhängigkeit von B und H. Es bezieht sich Kurve I auf schwedisches Holzkohleneisen, Kurve II auf weichen Eisendraht, Kurve III auf Gußeisen und Kurve IV auf Dynamostahlguß. Die in Fig. 105 gegebenen Kurven nennt man die Magnetisierungskurven der betreffenden Materialien.

[1]) In Heft 3, Seite 27, Fig. 29, ist für Gußeisen der Einfachheit halber angenommen, daß μ bei schwachen Sättigungen konstant ist, was nach dem hier Gesagten allerdings nicht genau zutrifft.

μ für Luft ist gleich eins, denn $B_l = H = \mu H$, die Magnetisierungskurve für Luft steigt also vom Nullpunkt des Koordinatensystemes geradlinig an.

Magnetisiert man ein vollständig unmagnetisches Eisenstück allmählich bis zu einer bestimmten Stärke und entfernt dann die magnetisierende Kraft, so wird das Eisenstück nicht sofort unmagnetisch, sondern es bleibt noch ein gewisser Magnetismus, der remanente Magnetismus, zurück. Diese Erscheinung der Remanenz ist eine sehr wichtige. Nur durch sie ist es möglich, selbsterregende Dynamomaschinen zu bauen[1]), nur durch sie ist es ferner möglich, permanente Magnete herzustellen. Aber diese Erscheinung hat auch eine schädliche Wirkung, nämlich dann, wenn es sich darum handelt, Eisen wieder unmagnetisch zu machen oder umzumagnetisieren.

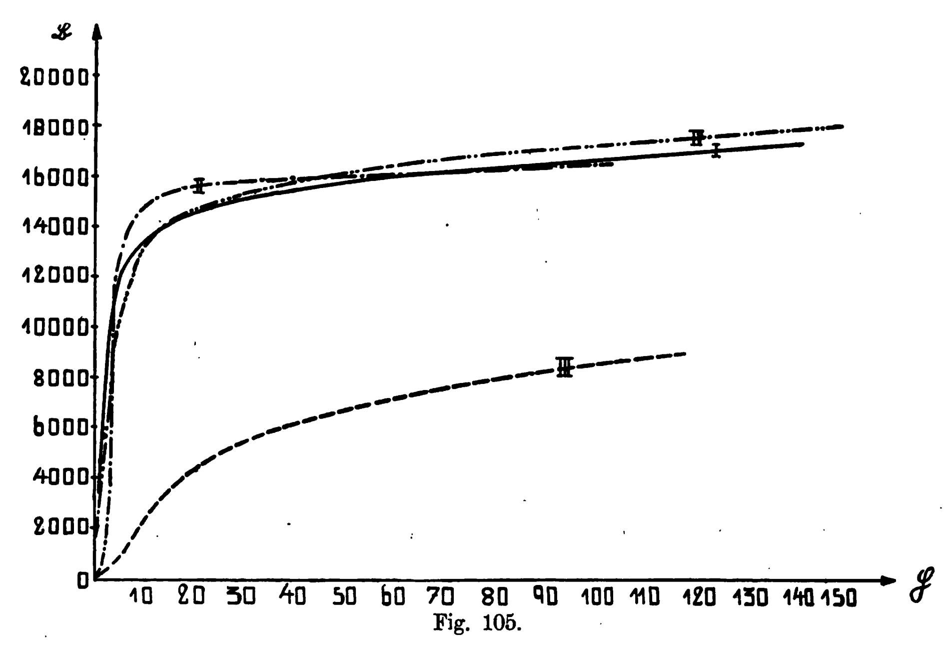


Fig. 105.

Um den remanenten Magnetismus wieder zu vernichten, d. h. das Eisenstück wieder unmagnetisch zu machen, muß man es in ein entgegengesetzt gerichtetes magnetisches Feld bringen. Die Feldstärke, welche nötig ist, um den remanenten Magnetismus wieder zu vernichten, wird Koerzitivkraft genannt.

Unterwirft man ein zunächst vollkommen unmagnetisches Eisenstück

[1]) Im Jahre 1867 machte Werner v. Siemens die Entdeckung, daß eine Sondererregung der Elektromagnete einer elektrischen Maschine nicht erforderlich ist, sondern daß der Strom der eigenen Maschine imstande ist, die Magnete zu erregen, nachdem nur einmal eine Erregung von fremdem Strome stattgefunden hat. Dreht man den Anker in dem Felde des remanenten Magnetismus, so wird eine ganz kleine elektromotorische Kraft erzeugt, welche in einem aus Ankerwicklung und Magnetwicklung hergestellten Stromkreis einen kleinen Strom hervorbringt. Dieser kleine Strom verstärkt den Magnetismus etwas, wodurch eine größere elektromotorische Kraft entstehen kann, welche wieder den Strom verstärkt usw., bis ein kräftiges Magnetfeld vorhanden ist. Alle nach diesem dynamoelektrischen Prinzip gebauten Maschinen heißen Dynamomaschinen oder dynamoelektrische Maschinen.



einem magnetischen Kreisprozeß, d. h. läßt man die Feldstärke allmählich von Null bis zu einem (positiven) Maximum anwachsen, dann wieder auf Null zurückgehen, im entgegengesetzten Sinne bis zu demselben (aber negativen) Maximalwerte anwachsen, wieder auf Null zurückgehen, und wieder bis zu dem (positiven) Maximalwerte ansteigen, so wird die Kraftliniendichte B in dem Eisenstück sich verändern, wie dies aus Fig. 106 zu ersehen ist.

Die Kurve OA, welche das Eisenstück nur einmal, und zwar bei der ersten Magnetisierung durchläuft, nennt man die jungfräuliche Kurve. OB ist die Größe des remanenten Magnetismus, OC die Koerzitivkraft.

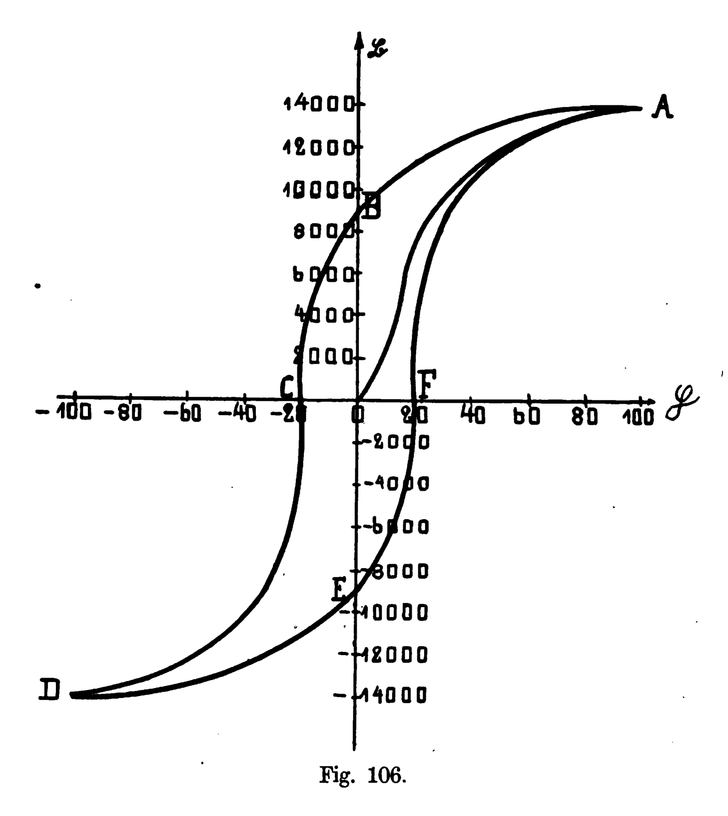


Fig. 106.

Man erkennt aus der vorstehenden Figur, daß die Stärke der Magnetisierung, welche ein Stück weiches Eisen in einem Magnetfelde erfährt, nicht nur von den augenblicklich auf den Stab einwirkenden magnetischen Kräften (H) abhängt, sondern auch von den magnetischen Zuständen, in welchen sich der Stab vorher befunden hat. Während die Stärke des magnetisierenden Feldes wächst, ist bei gleicher Feldstärke der Magnetismus des Stabes stets geringer, als wenn die magnetisierende Kraft abnimmt. Der hier beschriebenen Erscheinung hat man den Namen Hysteresis gegeben.

Die ganze Figur ABCDEFA heißt die Hysteresisschleife. Man sagt von einem Stück Eisen, welches alle diese magnetischen Zustände durchlaufen hat, es sei einem magnetischen Kreisprozesse unterworfen worden.

Die Größe des von der Hysteresisschleife eingeschlossenen Flächen-

stückes mißt den Betrag der Arbeit, welche aufgewendet werden muß, damit das Eisen den magnetischen Kreisprozeß einmal vollständig durchläuft.

Dieser Arbeitsaufwand, der Arbeitsverlust durch Hysteresis, zeigt sich im Eisen als Erwärmung desselben. Eine Eisenmasse, die oft hintereinander in entgegengesetztem Sinne magnetisiert wird, erwärmt sich infolge der Hysteresis.

Wenn man den Magnetismus nicht bis zur höchsten Sättigung (s. Anmerkung 1, Seite 94) treibt, sondern schon vorher die Magnetisierung wieder abnehmen und umkehren läßt, entstehen kleinere Hysteresisschleifen, die entsprechend kleinere Flächen umfassen und geringere Arbeitsaufwände erfordern.

Diese Hysteresiserscheinungen spielen in der Wechselstromtechnik eine große Rolle, weshalb in Heft 2 ausführlicher darauf eingegangen wird. In der Gleichstromtechnik tritt die Hysteresis hauptsächlich bei den Dynamoankern in die Erscheinung, da jedes Eisenteilchen des Ankers bei der Rotation von den wechselnden Magnetpolen fortwährend umpolarisiert werden muß (vor dem Nordpol muß es südmagnetisch, vor dem nächsten Südpol nordmagnetisch werden).

19. Pseudo-Ohmsches Gesetz für den Kraftlinienstromkreis.

Auf Seite 94 war die Gleichung

$$Z = \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot m \cdot i \cdot Q}{L}$$

abgeleitet. Diese Gleichung gilt für ein Solenoid, in dessen Innern sich Luft befindet. Steckt man jetzt in das Solenoid Eisen hinein, so wird (da $B = \mu H$) die Kraftlinienzahl im Eisen μ mal größer, also gilt für Eisen die Gleichung

$$Z = \mu \cdot \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot mi \cdot Q}{L}.$$

Da μ für Luft gleich 1 gesetzt wird, gilt diese Gleichung also auch ganz allgemein, ganz gleichgültig, welches Material sich im Innern der Spule befindet.

Dieser Formel kann man nun folgende Gestalt geben:

$$Z = \mu \cdot \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot m \cdot i \cdot Q}{L} = \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot m \cdot i}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{L}{Q}}.$$

Unwillkürlich erinnert diese Gleichung an das Ohmsche Gesetz für den elektrischen Stromkreis [1]), weshalb man es das Ohmsche Gesetz für den Magnetstromkreis genannt hat. Die Größe $\frac{4\pi}{10}$ mi bezeichnet man als

[1]) $I = \frac{E}{W} = \frac{E}{s \cdot \frac{L}{Q}} = \frac{\text{Elektromotorische Kraft}}{\text{Elektrischer Widerstand}}.$

die magnetomotorische Kraft, weil sie die Ursache des Magnetstromes ist, $\frac{1}{\mu} \cdot \frac{L}{Q}$ ist der magnetische Widerstand, welchen der Magnetstrom auf seinem Wege findet.

$$\text{Kraftlinienzahl} = \frac{\text{Magnetomotorische Kraft}}{\text{Magnetischer Widerstand}}.$$

Die magnetomotorische Kraft ist also die Amperewindungszahl multipliziert mit $\frac{4\pi}{10} = 1{,}257$; der magnetische Widerstand ist direkt proportional der Länge [1]) des Kraftlinienweges, und umgekehrt proportional dem Querschnitt [1]) des Kraftlinienweges, er hängt ferner von dem spezifischen magnetischen Widerstand $\frac{1}{\mu}$ ab, welcher für die verschiedenen Materialien verschieden groß ist (siehe Seite 95).

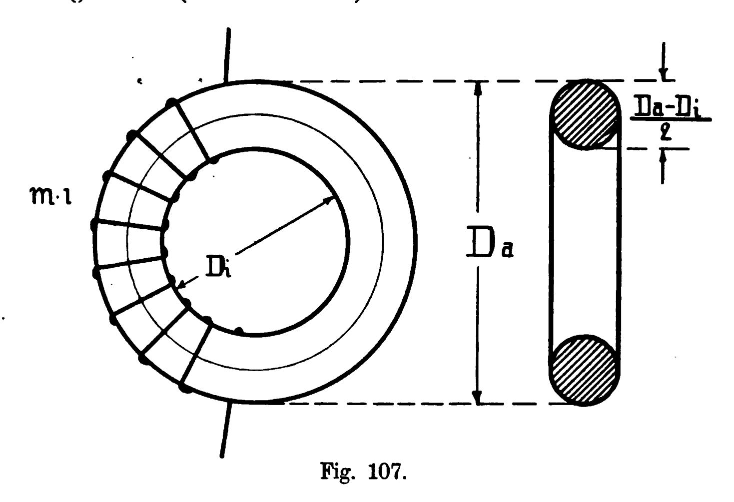


Fig. 107.

Bei den magnetischen Kraftlinien ist genau ebenso wie beim elektrischen Stromkreis ein geschlossener Weg vorhanden. In einem solchen Kraftlinienstromkreis können an mehreren Stellen magnetomotorische Kräfte (MMK) sitzen, es können mehrere Widerstände (hintereinander oder parallel geschaltet) vorhanden sein, genau so wie im elektrischen Stromkreis und auch dann gilt das Gesetz:

$$\text{Kraftlinienzahl} = \frac{\text{Algebraische Summe aller MMK}}{\text{Summe aller hintereinandergesch. Widerstände}}\ ^{2)}.$$

[1]) Zu beachten ist hier, daß die Längendimensionen alle in Zentimeter einzusetzen sind, da alle Größen auf das CGS-System (s. Seite 25) zurückzuführen sind.

[2]) Diesem Gesetze scheint die Formel für die Kraftlinienzahl eines Solenoides (Seite 94) zu widersprechen, denn dort ist für die Länge des Kraftlinienweges nur die Länge der Spule L eingesetzt, während doch die Kraftlinien sich durch den umgebenden Luftraum schließen, also in Wirklichkeit einen viel größeren Weg als L durchlaufen. Dieser scheinbare Widerspruch findet dadurch seine Aufklärung, daß die Kraftlinien eines Solenoides in Wirklichkeit nur in dem Inneren desselben einen nennenswerten Widerstand finden. Außerhalb des Solenoides steht den Kraftlinien der unendlich große Querschnitt des umgebenden Raumes zur Verfügung, so daß $\frac{L}{Q}$ für den äußeren Kraftlinienweg gleich $\frac{L}{\infty} = 0$ wird.

Fall 1. Ein geschlossener Eisenring (Fig. 107).

Man muß zunächst die Länge der mittleren Kraftlinie bestimmen. Sämtliche Kraftlinien verlaufen selbstverständlich im Eisen, da dieses bedeutend besser leitet als die Luft. Die mittlere Kraftlinienweglänge (in Fig. 107 dünn ausgezogen) ist also:

$$L = \frac{D_a + D_i}{2} \cdot \pi = 1{,}57 \cdot (D_a + D_i),$$

$$Q = \left(\frac{D_a - D_i}{2}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0{,}196 \cdot (D_a - D_i)^2.$$

$$Z = \frac{1{,}257 \cdot mi}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{1{,}57 \cdot (D_a + D_i)}{0{,}196 \cdot (D_a - D_i)^2}} = 0{,}157 \cdot \mu \cdot \frac{(D_a - D_i)^2}{D_a + D_i} \cdot mi.$$

Fall 2. Ein Eisenring mit Luftzwischenraum (Fig. 108).

Man hat es hier mit zwei verschiedenen hintereinandergeschalteten Widerständen W_1 und W_2 zu tun:

$$\text{Widerstand in Eisen } W_1 = \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{L_1}{Q_1}.$$

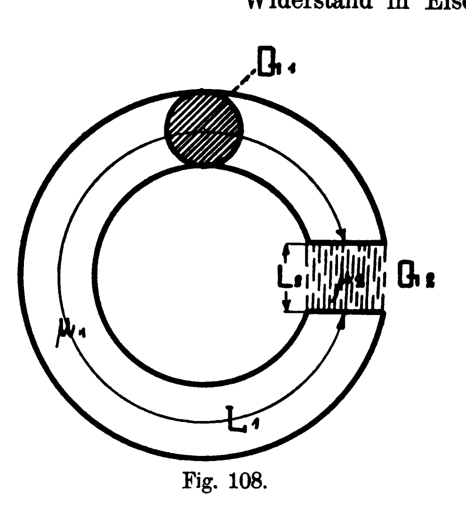


Fig. 108.

Widerstand im Luftzwischenraum

$$W_2 = \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{L_2}{Q_2} = \frac{L_2}{Q_2}$$

(da für Luft $\mu_2 = 1$).

$$Z = \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot mi}{\frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{L_1}{Q_1} + \frac{L_2}{Q_2}}.$$

Es fragt sich nun, wie groß der Querschnitt Q_2 des Luftraumes zu rechnen ist. Theoretisch wäre er eigentlich unendlich groß, man setzt aber $Q_2 = Q_1$, da die Kraftlinien sich den bequemsten Weg aussuchen; dies ist aber der direkte Weg von Eisen zu Eisen. (Über die dabei unvermeidliche Kraftlinienstreuung siehe unten Seite 113.)

Fall 3. Ein zweimal unterbrochener Eisenweg (Fig. 109).

Es sei

$$\mu_2 = \mu_4 = 1. \qquad L_2 = L_4.$$

$$Q_2 = Q_4 = \frac{Q_1 + Q_3}{2} \text{ [1]}).$$

$$Z = \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot mi}{\frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{L_1}{Q_1} + 2\,\frac{L_2}{Q_2} + \frac{1}{\mu_3} \cdot \frac{L_3}{Q_3}}.$$

[1]) Da $Q_1 < Q_3$, so werden sich die Kraftlinien beim Übergang von Q_1 nach Q_2 ausbreiten. Als mittleren Querschnitt des Luftzwischenraumes muß man daher das arithmetische Mittel aus Q_1 und Q_3 nehmen.

Fall 4. Parallelgeschaltete Widerstände (Fig. 110).

Die Widerstände W_1 und W_2 sind parallelgeschaltet.

Die Widerstände W_3, W_4, W_5, W_6 und W_7 sind hintereinandergeschaltet.

Der Gesamtwiderstand für die Kraftlinien Z ist demnach

$$W = W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 + \frac{W_1 \cdot W_2}{W_1 + W_2}.$$

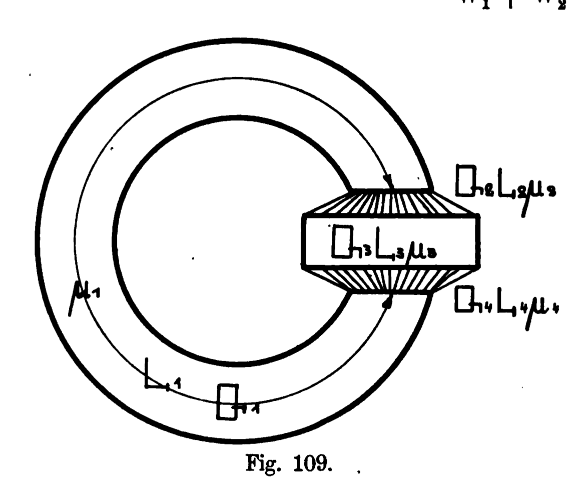


Fig. 109.

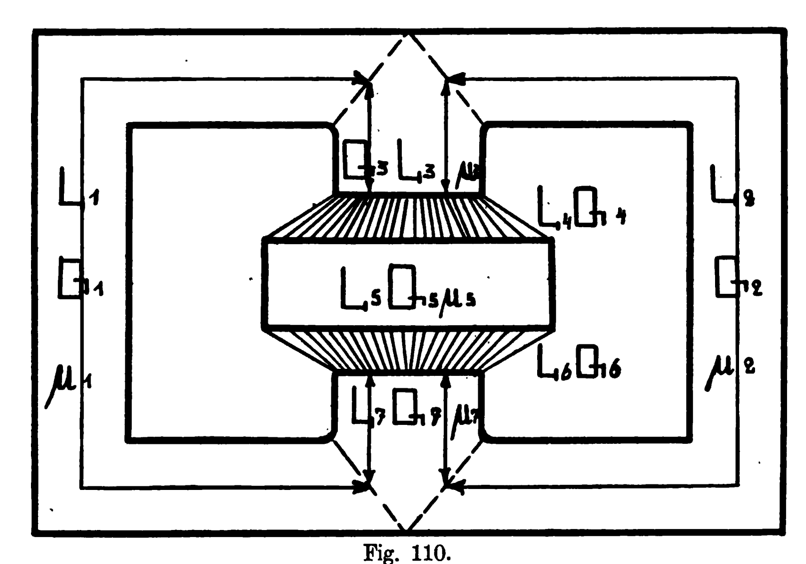


Fig. 110.

$$W = \frac{1}{\mu_3} \cdot \frac{L_3}{Q_3} + \frac{1}{\mu_4} \cdot \frac{L_4}{Q_4} + \frac{1}{\mu_5} \cdot \frac{L_5}{Q_5} + \frac{1}{\mu_6} \cdot \frac{L_6}{Q_6} + \frac{1}{\mu_7} \cdot \frac{L_7}{Q_7} + \frac{\frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{L_1 \cdot L_2}{Q_1 \cdot Q_2}}{\frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{L_1}{Q_1} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{L_2}{Q_2}}$$

$$= \frac{1}{\mu_3} \cdot \frac{L_3}{Q_3} + \frac{L_4}{Q_4} + \frac{1}{\mu_5} \cdot \frac{L_5}{Q_5} + \frac{L_6}{Q_6} + \frac{1}{\mu_7} \cdot \frac{L_7}{Q_7} + \frac{L_1 \cdot L_2}{\mu_2 \cdot Q_2 \cdot L_1 + \mu_1 \cdot Q_1 \cdot L_2}.$$

Ist $W_1 = W_2$; $W_3 = W_7$; $W_4 = W_6$, so wird

$$W = \frac{W_1}{2} + 2 \cdot W_3 + 2 \cdot W_4 + W_5$$

$$= \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{L_1}{2\,Q_1} + 2 \cdot \frac{1}{\mu_3} \cdot \frac{L_3}{Q_3} + 2 \cdot \frac{L_4}{Q_4} + \frac{1}{\mu_5} \cdot \frac{L_5}{Q_5}.$$

$$Z = \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot mi}{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{L_1}{Q_1}\right) + 2 \cdot \frac{1}{\mu_3} \cdot \frac{L_3}{Q_3} + 2 \cdot \frac{L_4}{Q_4} + \frac{1}{\mu_5} \cdot \frac{L_5}{Q_5}},$$

wobei
$$Q_4 = Q_6 = \frac{Q_3 + Q_5}{2}.$$

20. Berechnung der Amperewindungen.

Zur Berechnung der zur Erzeugung einer gewissen Kraftlinienzahl Z erforderlichen Amperewindungen ($m \cdot i$) gibt man der Gleichung (Seite 100)

$$Z = \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot mi}{\frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{L_1}{Q_1} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{L_2}{Q_2} + \ldots}$$

eine bequemere Form.

Es wird

$$\frac{4\pi}{10} mi = Z \left(\frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{L_1}{Q_1} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{L_2}{Q_2} + \ldots\right)$$

$$= \frac{Z}{Q_1} \cdot \frac{1}{\mu_1} \cdot L_1 + \frac{Z}{Q_2} \cdot \frac{1}{\mu_2} \cdot L_2 + \ldots$$

$$mi = \frac{10}{4\pi} \cdot \frac{Z}{Q_1} \cdot \frac{1}{\mu_1} \cdot L_1 + \frac{10}{4\pi} \cdot \frac{Z}{Q_2} \cdot \frac{1}{\mu_1} L_2 + \ldots$$

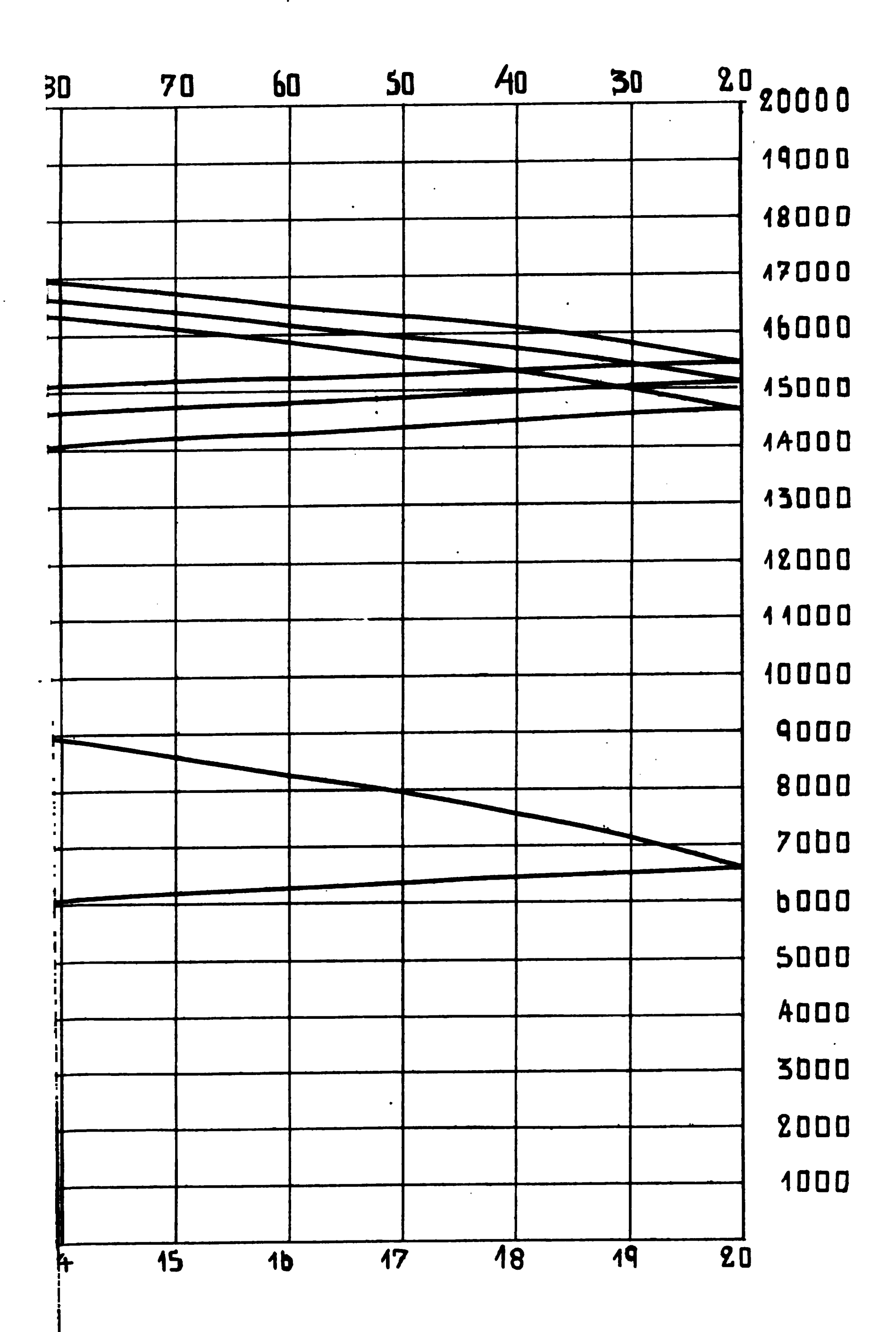
Nun ist aber $\frac{10}{4\pi} = 0{,}8$, ferner

$$\frac{Z}{Q} = \frac{\text{Kraftlinienzahl}}{\text{Querschnitt des Kraftlinienweges}} = \text{Kraftlinienzahl pro cm}^2 = B,$$

folglich ist

$$mi = \left(0{,}8 \frac{B_1}{\mu_1}\right) L_1 + \left(0{,}8 \frac{B_2}{\mu_2}\right) L_2 + \ldots$$

Die eingeklammerten Werte $0{,}8 \frac{B}{\mu}$ bedeuten nun aber nichts weiter, als die Amperewindungszahl, welche erforderlich ist, um die Kraftlinienzahl Z durch den vorhandenen Querschnitt Q eines Materiales welches die Permeabilität μ besitzt, hindurchzutreiben, wenn $L = 1$ cm, also bedeutet $0{,}8 \frac{B}{\mu}$ die Amperewindungszahl pro Zentimeter Kraftlinienweg.



80
70
60
50
40
30
20
20000
19000
18000
17000
16000
15000
14000
13000
12000
11000
10000
9000
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
14
15
16
17
18
19
20

Diese Werte $0{,}8\ \frac{B}{\mu}$ kann man aus den nach Kapp wiedergegebenen Kurven in Fig. 111 für die verschiedenen Materialien entnehmen[1]).

Der Gebrauch der Formel und Tabelle möge an einem typischen Beispiele erläutert werden (Fig. 112).

In dem Eisenstück A sollen Z Kraftlinien erzeugt werden. Die magnetischen Widerstände sollen dieselben Bezeichnungen haben, wie in Fig. 110, Seite 101.

Wenn man in dem Eisenstück A eine ganz bestimmte Kraftlinienzahl Z haben will, so muß man die bereits oben Seite 100 angedeutete Kraftlinienstreuung berücksichtigen. Da ein Teil der in den Magnetpolen vorhandenen Kraftlinien nicht in das Eisenstück A kommt, sondern sich auf anderem Wege (um A herum) schließt, so muß man im Magneten mehr Kraftlinien haben, als in A gebraucht werden.

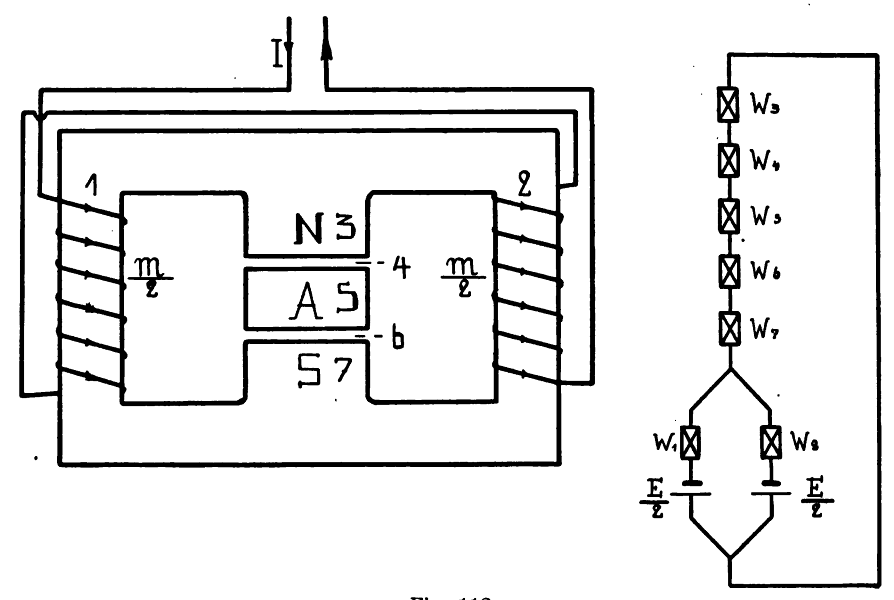


Fig. 112.

Bezeichnet man die Kraftlinienzahlen in den einzelnen Teilen der vorliegenden Anordnung durch Z mit dem entsprechenden Index (also Z_1, Z_2, Z_3, usw.), so muß

$$Z_3 > Z_5, \text{ und zwar setzt man } Z_3 = \varepsilon Z_5$$

und nennt ε den Streuungskoeffizienten. ε muß stets größer als 1 sein.

Man kann die Berechnung wie folgt durchführen:

Die auf dem Joch 1 aufgebrachte Amperewindungszahl $\frac{I \cdot m}{2}$ muß

[1]) Die Figur enthält für jedes Material zwei Kurven, die untere gilt für die untere Abszisse (also für 0 bis 21 Amperewindungen), die obere gilt für die obere Abszisse (also für 21 bis 210 Amperewindungen).



die eine Hälfte, die auf dem Joch 2 aufgebrachte gleichgroße Amperewindungszahl die andere Hälfte Kraftlinien erzeugen.

Der Querschnitt $Q_3 = Q_4 = Q_5 = Q_6 = Q_7$ sei gleich Q, der Querschnitt

$Q_1 = Q_2 = \frac{Q}{2}$,

dann ist

$$B_5 = B_4 = B_6 = \frac{Z}{Q} = B,$$

$$B_3 = B_7 = \frac{\varepsilon Z}{Q} = \varepsilon B,$$

$$B_1 = B_2 = \frac{\varepsilon Z}{2} : \frac{Q}{2} = \frac{\varepsilon Z}{Q} = \varepsilon B,$$

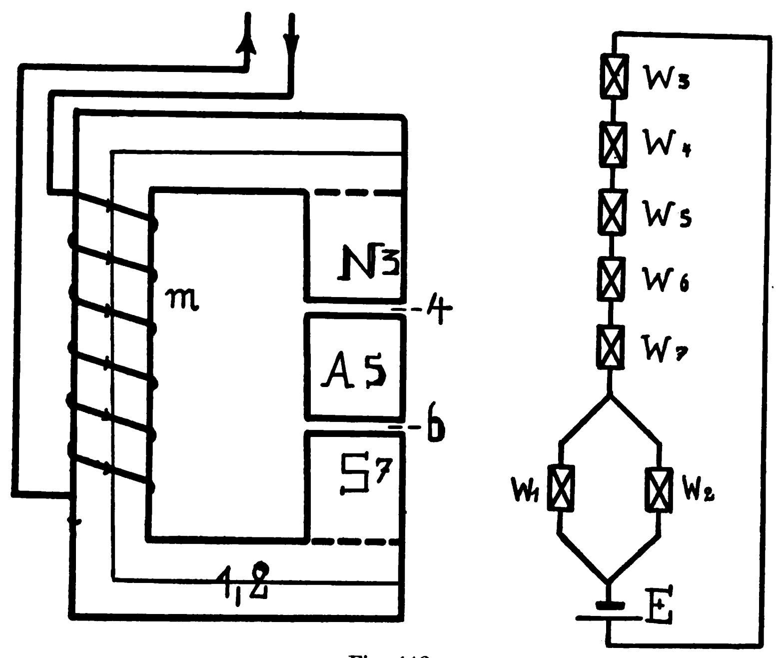


Fig. 113.

folglich ist $\frac{m \cdot I}{2} = 0{,}8 \left(\frac{B_1}{\mu_1} \cdot L_1 + 2 \frac{B_3}{\mu_3} \cdot L_3 + 2 \frac{B_4}{\mu_4} \cdot L_4 + \frac{B_5}{\mu_5} \cdot L_5 \right)$

$$= \left(0{,}8 \frac{\varepsilon B}{\mu_1}\right) \cdot L_1 + \left(0{,}8 \frac{\varepsilon B}{\mu_3}\right) \cdot 2\, L_3 + (0{,}8\, B) \cdot 2 \cdot L_4 + \left(0{,}8 \frac{B}{\mu_5}\right) L_5.$$

Es möge sein:

$Z = 3000000$	$Q = 300$ qcm	$\varepsilon = 1{,}2$
$L_1 = L_2 = 50$ cm		$L_4 = L_6 = 1$ cm
$L_3 = L_7 = 20$ „		$L_5 = 20$ „

Dann ist $B = \frac{Z}{Q} = 10000$; $\varepsilon B = 12000$.

Das Joch 1 und 2 möge aus Gußeisen, die Magnetpole 3 und 7 aus Schmiedeeisen, das Eisenstück 5 aus Ankerblech sein.

Es wird dann aus der Kurventafel Fig. 111, die Amperewindungszahl pro Zentimeter Kraftlinien ermittelt und zwar ergeben sich für

Joch:	Gußeisen,	B = 12000	ca. 220 Amp.-Wind. pro cm
Magnetpol:	Schmiedeeisen,	B = 12000	„ 6,2 „ „ „ „
Luft:		B = 10000	„ 8000[1]) „ „ „ „
Eisen A:	Ankerblech,	B = 10000	„ 2,4 „ „ „ „

Es wird also

$$\frac{I \cdot m}{2} = \begin{cases} + \; 220 \cdot 50 = 11000 \\ + \; 6{,}2 \cdot 2 \cdot 20 = 248 \\ + \; 8000 \cdot 2 \cdot 1 = 16000 \\ + \; 2{,}5 \cdot 20 = 48 \end{cases}$$

$= 27296$ Amperewindungen

$I \cdot m$ ist infolgedessen rund 54600 Amperewindungen. Beträgt I beispielsweise 10 Ampere, so würden im ganzen 5460 Windungen oder pro Schenkel 2730 Windungen aufzubringen sein.

Bei der Anordnung Fig. 113 würden bei gleichen Längen und Kraftliniendichten im ganzen nur 27300 Amperewindungen (also nur halb so viel als bei der Anordnung Fig. 112) erforderlich sein[2]).

21. Wirbelströme (Foucaultströme).

Sobald ein elektrischer Leiter von Kraftlinien geschnitten wird, entsteht in ihm eine elektromotorische Kraft, und wenn ein Stromweg vorhanden ist, ein Strom (Induktionsstrom). Erzeugt man diese EMK in Drähten, so kann man den Stromweg beliebig gestalten. Anders ist es, wenn massive Körper von Kraftlinien geschnitten werden. In diesem Fall ist der Verlauf der Induktionsströme ein ziemlich unregelmäßiger. Die Ströme verfolgen eine innerhalb des Körpers geschlossene wirbelförmige Bahn, weshalb sie **Wirbelströme**, oder nach ihrem Entdecker **Foucaultströme** genannt werden. Da der Leitungswiderstand in massiven Metallmassen sehr klein ist, sind die Ströme, die in denselben induziert werden, sehr stark. Das Metall wird durch diese Ströme erwärmt.

Wenn sich ein Magnet in der Nähe einer Metallmasse bewegt, so rufen die in die Metallmassen eintretenden und aus ihr wieder austretenden Kraftlinien in derselben Induktionsströme hervor, welche der Bewegung des Magneten entgegenwirken (siehe Lenzsches Gesetz, Seite 34). Der Magnet bewegt sich daher in der Nähe von Metallmassen ähnlich, als ob er in eine zähe Flüssigkeit eingetaucht wäre. Man benutzt dies bei Meßinstrumenten zur Dämpfung der Nadelausschläge (elektromagnetische Dämpfung, siehe Heft 3). Bei den Wirbelstrombremsen werden die in einer rotierenden Metallmasse erzeugten Wirbelströme für die Bremswirkung ausgenutzt.

---

[1]) Die für 1 Zentimeter Luftweg erforderliche Amperewindungszahl ist immer $0{,}8 \cdot B$.

[2]) Die Verhältnisse sind also ganz analog den Verhältnissen im elektrischen Stromkreis. Für Fig. 112 gilt

$$\frac{E}{2} = \frac{I}{2} \cdot W_1 + I(W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7).$$

Für Fig. 113

$$E = \frac{I}{2} \cdot W_1 + I(W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7),$$

also $\frac{E}{2}$ im ersten Falle ist gleich E im zweiten Falle.

Bei elektrischen Maschinen sind die auftretenden Wirbelströme dagegen recht störende Erscheinungen. Bei einer Gleichstrommaschine z. B. wird der Anker bei seiner Rotation genau so von Kraftlinien geschnitten, wie die auf seinem Umfange gewickelten Kupferdrähte (Fig. 114). Es entstehen also im Ankereisen EMKK derselben Richtung wie in den Drähten. Da die induzierten EMKK an den verschiedenen Stellen des Ankers ungleich ausfallen, so treten zwischen den einzelnen Punkten des Ankers Spannungsdifferenzen und folglich Ströme auf. Zur Erzeugung dieser Ströme muß aber natürlich an der Riemenscheibe Arbeit geleistet werden, welche durch die Wirbelströme im Anker nutzlos in Wärme umgesetzt wird. Die Wirbelströme bedeuten also nicht nur einen Arbeitsverlust, sondern sie bringen auch eine starke Erwärmung hervor. Um das Auftreten der Wirbelströme zu verhindern bzw. zu beschränken, schneidet man ihnen gewissermaßen den Weg ab, indem man das Eisen aus dünnen, voneinander isolierten Blechscheiben herstellt, die so gelagert sein müssen, daß sie den Kraftlinienweg nicht behindern, dagegen den Weg der Wirbelströme unterbrechen (Fig. 115).

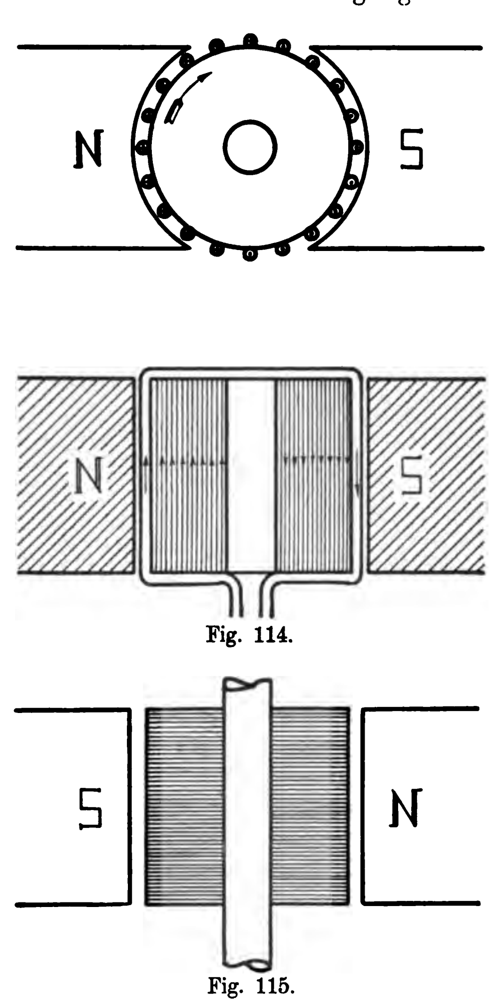


Fig. 114.

Fig. 115.

Da die Wirbelstromerscheinungen für die Wechselstromtechnik von ganz besonderer Bedeutung sind, wird auf diesen Gegenstand im Heft 2 noch ausführlich eingegangen werden.

22. Gegenseitige Induktion und Selbstinduktion.

Die gegenseitige Induktion und Selbstinduktion spielen in der Wechselstromtechnik eine Hauptrolle. Die ausführliche Besprechung dieser Erscheinungen findet sich daher auch im Heft 2. Hier soll nur ganz kurz das Wesen beider Induktionswirkungen angedeutet werden.

Die gegenseitige Induktion ist bereits Seite 36 besprochen und durch Fig. 48 erläutert. Ändert sich in dem Draht A die Stromstärke, so wird in dem Drahte B ein Induktionsstrom von ganz bestimmter Richtung erzeugt. Zwischen den beiden Drähten A und B findet also eine gegenseitige Induktion statt. Diese Erscheinung spielt hauptsächlich in der

Telephonie eine große Rolle, sie verursacht, sobald die Erde als Rückleitung verwendet wird, das Mithören von Gesprächen, welche auf anderen auf demselben Gestänge oder in demselben Kabel geführten Leitungen stattfinden. Anders ist es, wenn Hin- und Rückleitungen nebeneinander liegen, dann ist, wie Fig. 116 erkennen läßt, eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen. Im Drahte A soll ein von unten nach oben gerichteter Strom entstehen. Dann breiten sich die Kraftlinien in dem angegebenen Sinne von links nach rechts aus und schneiden die Doppelleitung $B_1 B_2$ und induzieren darin eine EMK, die nach der Rechtehandregel von oben nach unten gerichtet sein muß. Die in B_1 induzierte EMK ist aber in der Schleife $B_1 B_2$ der in B_2 induzierten entgegengesetzt gerichtet, d. h. die beiden EMK heben sich gegenseitig auf.

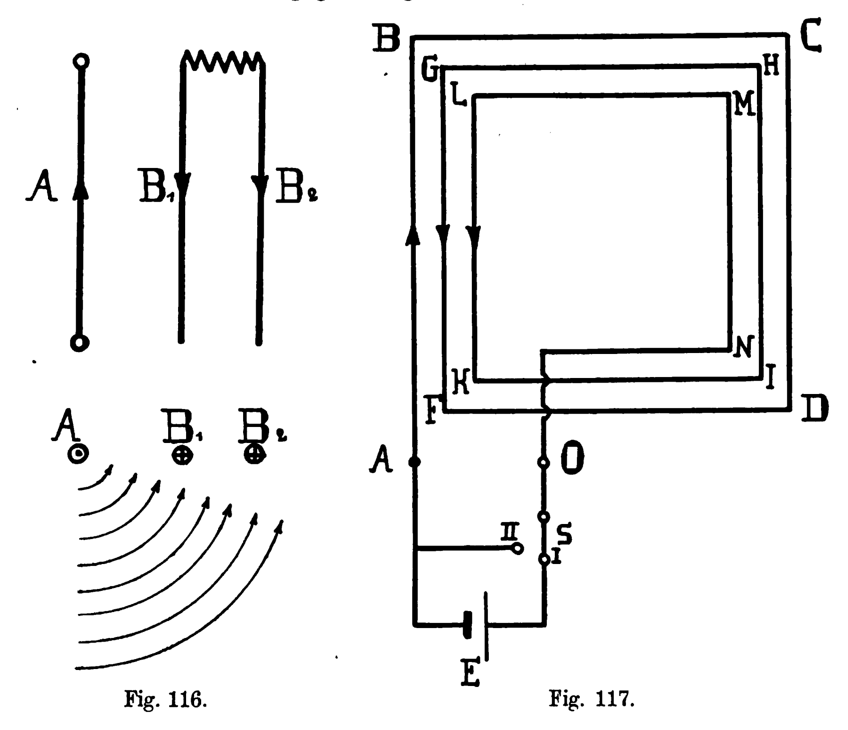


Fig. 116. Fig. 117.

Von **Selbstinduktion** spricht man, wenn die aus einem Stromleiter durch den Strom erzeugten Kraftlinien denselben Stromleiter an einer oder mehreren anderen Stellen nochmals schneiden und dadurch eine EMK, die **elektromotorische Kraft der Selbstinduktion**, erzeugen.

Wenn man in den Fig. 117 dargestellten Leiter einen Strom hineinsendet, indem man den Schalter S auf Kontakt I stellt, so braucht der Strom eine gewisse, wenn auch sehr kleine Zeit, um vom Anfang A zum Ende O des Leiters zu kommen. Solange der Strom nur in AB entsteht, werden die aus AB austretenden Kraftlinien den Stromleiter auf den Strecken FG und KL schneiden und in jeder dieser Strecke eine EMK e_s erzeugen, die nach dem eben Gesagten dem in AB entstehenden Strom oder der EMK E entgegengesetzt gerichtet ist. Wenn der Strom über C und D nach F gekommen ist, so haben die dadurch erzeugten Kraftlinien sämtliche den Draht FGHIKLMNO geschnitten und auf dieser ganzen

Strecke eine elektromotorische Gegenkraft erzeugt, deren Größe $8\,e_s$ ist, wenn man mit $4\,e_s$ die EMK einer (aus 4 Seiten bestehenden) Windung bezeichnet. Ist der Ohmsche Widerstand der drei Windungen gleich W Ohm, so müßte I sofort beim Einschalten $I = \frac{E}{W}$ werden. Infolge der elektromotorischen Gegenkraft ist aber die wirksame Spannung nur $E - 8\,e_s$, so daß I nur gleich $\frac{E - 8\,e_s}{W}$ ist. Durcheilt der Strom jetzt die zweite Windung FGHIK, so ist die elektromotorische Gegenkraft nur noch $4\,e_s$ (nämlich in der Windung KLMNO, die Stromstärke also auf $\frac{E - 4\,e_s}{W}$ gestiegen; erst wenn der Strom am Ende der Leitung angelangt ist, hat I seine durch das Ohmsche Gesetz bestimmte Größe erreicht. Die Selbstinduktionserscheinungen verzögern also das Entstehen des Stromes.

Bei plötzlichem Umlegen des Schalters S auf Kontakt II (Fig. 117) findet das Umgekehrte statt. Da die elektromotorische Kraft E aus dem

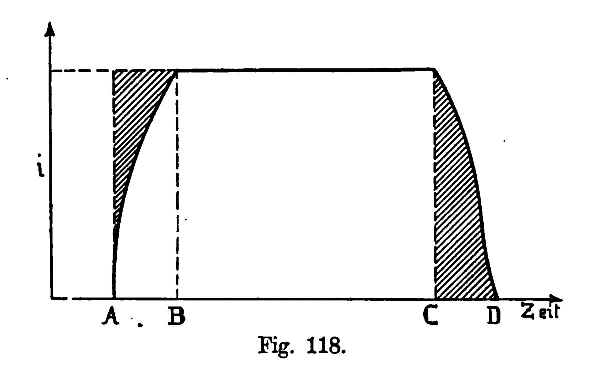


Fig. 118.

Stromkreis entfernt ist, müssen die Kraftlinien alle wieder in den Leiter, aus dem sie herausgequollen sind, zurücktreten, es wird jetzt in den Windungen eine EMK erzeugt, welche die gleiche Richtung hat, als der verschwindende Strom, es wird also jetzt das Verschwinden des Stromes verzögert.

Den Vorgang graphisch dargestellt ergibt die Stromkurve Fig. 118. Zur Zeit A wird der Strom eingeschaltet, erst zur Zeit B hat der Strom seine durch das Ohmsche Gesetz bestimmte Stärke erreicht, bei C wird der Strom ausgeschaltet, erst bei D ist der Strom gleich Null geworden.

Die Größe der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion hängt von der Kraftlinienschnittzahl ab, sie wird also um so größer sein, je mehr Kraftlinien entstehen bzw. verschwinden und je mehr Windungen des Drahtes nebeneinanderliegen.

Die durch die Selbstinduktion erzeugten Ströme nennt man Extraströme.

Bringt man statt des Umschalters S in Fig. 117 einen einfachen Schalter zur Anwendung, so kann beim Öffnen, da der Stromkreis plötzlich unterbrochen wird, ein eigentlicher Öffnungsextrastrom nicht zustande kommen. Trotzdem aber ist eine Tendenz für den Öffnungsstrom (eine EMK) vorhanden.

Die Extraströme spielen bei allen veränderlichen Strömen eine sehr wichtige Rolle. In einer Spule hat der Extrastrom eine um so höhere elek-

tromotorische Kraft, je rascher die Intentität des primären Stromes sich ändert. Infolgedessen verhalten sich die Schließungs- und die Öffnungsextraströme nicht gleich. Beim Schließen eines Stromes wächst die Stromstärke allmählich von Null an bis zu ihrem vollen Endwert. Die Änderung der Stromstärke ist also keine plötzliche, sondern eine allmähliche; daher hat der Schließungsextrastrom eine verhältnismäßig geringe Spannung. Anders ist es beim Öffnen eines Stromes: kurz vor dem Öffnen hat der primäre Strom noch seine volle Stärke und gleich darauf ist die Stromstärke gleich Null geworden. Die Änderung der Stromstärke bei der Öffnung eines Stromes ist daher eine sehr rasche und plötzliche. Der Öffnungsextrastrom hat infolgedessen eine sehr hohe Spannung, eine viel höhere als der Schließungsextrastrom. Der Öffnungsstrom ist so hochgespannt, daß er die Luftschicht zwischen den beiden Leitern, durch deren Trennung der Strom geöffnet ist, in einem Funken durchbricht. Obwohl er also keinen geschlossenen Weg durch den Draht mehr findet, fließt er doch, und zwar durch die Luftschicht zwischen den Unterbrechungsstellen. Allgemein erhält man *immer* beim Öffnen eines nicht zu schwachen Stromes infolge von Selbstinduktionserscheinungen Funken, welche man Öffnungsfunken nennt.

Sachregister.

K.

L.

M.

N.

O.

P.

Z.

